

Renato Machado de Souza

**SISTEMAS DE SHEAROGRAFIA PARA INSPEÇÃO DE
GRANDES ÁREAS VERTICAIS REVESTIDAS POR
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica na Área de Concentração em
Metrologia e Instrumentação da
UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA para a obtenção
do Grau de MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Prof. Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Daniel Pedro
Willemann, Dott. Ing.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Souza, Renato Machado de

Sistemas de shearografia para inspeção de grandes áreas
verticais revestidas por materiais compósitos / Renato
Machado de Souza ; orientador, Armando Albertazzi
Gonçalves Júnior ; coorientador, Daniel Pedro Willemann. -
Florianópolis, SC, 2015.

102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Inspeção de grandes áreas. 3.
Shearografia. 4. Ensaio não-destrutivo. 5. Materiais
compósitos. I. Gonçalves Júnior, Armando Albertazzi . II.
Willemann, Daniel Pedro . III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Renato Machado de Souza

**SISTEMAS DE SHEAROGRAFIA PARA INSPEÇÃO DE
GRANDES ÁREAS VERTICAIS REVESTIDAS POR
MATERIAIS COMPÓSITOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 18 de março de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Daniel Pedro Willemann, Dott. Ing.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng. (Presidente)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Matias Roberto Viotti, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais,
Marcio e Geni, ao meu irmão Bruno, e
às minhas avós Tereza e Martha.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina através do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e seus colaboradores.

À ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, por meio do Programa de Recursos Humanos - PRH34 pelos recursos financeiros, oportunidade e estrutura.

À Petrobras, pelo financiamento do projeto SHIC2, no qual esse trabalho está incluído.

Ao setor de compras da FEESC - Fundação de Ensino de Engenharia de Santa Catarina, pela atenção e seriedade na realização de orçamentos e compras necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

À Clarissa Kellermann de Moraes, secretária do PRH34, pelo excelente atendimento aos bolsistas e serviço prestado.

À Rosana Vieira, demais colaboradores e colegas do Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC - Labmetro.

Ao meu orientador Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. pelos ensinamentos, sábia orientação, disponibilidade, confiança e pela oportunidade de desenvolver a pesquisa nesta área.

Ao meu coorientador Daniel Pedro Willemann pelo auxílio nas tomadas de decisão do projeto, realização de ensaios e conhecimentos transmitidos.

Aos pesquisadores Cláudio Ramos Schmitz e Mauro Eduardo Benedit pelo auxílio nos ensaios, conhecimentos e experiências compartilhadas.

Aos amigos Vitor Farias de Borba, Filipe Fontana e Gregory Chagas da Costa Gomes pelos conhecimentos compartilhados e conselhos recebidos. Aos demais mestrandos, doutorandos e colegas das disciplinas cursadas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do grupo db que me acompanharam durante esta etapa da minha vida.

Às avós Tereza e Martha pela compreensão em relação a menor frequência de visitas durante o envolvimento neste trabalho.

À Ana Paula Machado pela convivência, companheirismo, apoio e amizade em todos os momentos.

Ao meu irmão Bruno pela aprendizagem que ter um irmão proporciona.

Por último, agradeço aos meus pais, Marcio e Geni, pelo exemplo de vida e incentivo diário à busca pelo conhecimento.

A aprendizagem é um processo nunca estanque, sempre contínuo e inacabado, do qual pode-se perceber que decorre a evolução da humanidade.

(Geni Machado de Souza, 2006)

RESUMO

Nos últimos anos vem sendo frequente a utilização de materiais compósitos em revestimentos de tubulações, tanques e costados de navios para proteção anticorrosiva e reforço estrutural. Entretanto, é necessário assegurar que o material compósito, geralmente plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) ou carbono (PRFC), desempenhe sua função com eficiência. Entre as técnicas utilizadas para avaliação da integridade e eficiência da adesão desses materiais, destaca-se a inspeção por shearografia, técnica não-destrutiva que utiliza interferometria laser para detecção de defeitos. Através da shearografia, é possível detectar falhas de adesão e delaminações indicando casos críticos onde uma intervenção por parte da equipe de manutenção é necessária. No entanto, a inspeção de grandes áreas revestidas por materiais compósitos, costuma ser um processo lento o que resulta em custos elevados. Dessa forma, a movimentação automatizada do sistema de shearografia por meio de um robô atuado por cabos mostra-se uma alternativa viável para redução de custos envolvidos no processo e aumento de produtividade. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de dois sistemas de inspeção com shearografia, sendo o primeiro um sistema que pode ser acoplado a um robô atuado por cabos para a inspeção completa de uma área revestida por material compósito e o segundo um sistema para a inspeção manual em situações em que não existe a necessidade de inspecionar toda a área revestida. Para comparação e validação dos resultados obtidos com os dois sistemas, foram utilizados: (a) um terceiro sistema de inspeção previamente validado pela equipe de inspeções do Labmetro/UFSC, (b) um corpo de prova com defeitos introduzidos artificialmente e (c) um dispositivo desenvolvido para simular as forças de tração encontradas nos cabos de um sistema robotizado. Nos ensaios realizados em laboratório, foi possível detectar os defeitos presentes no corpo de prova com resultados equivalentes ao sistema de referência utilizado para comparação.

Palavras-chave: Inspeção de grandes áreas. Shearografia. Materiais compósitos. Ensaios não-destrutivos. Sistema robotizado atuado por cabos.

ABSTRACT

Nowadays, composite materials have been used as coatings for pipes, tanks and vessels sidewalls for corrosion protection and structural reinforcement. However, it is necessary to ensure the composite integrity, usually glass-fiber reinforced plastic (GFRP) or carbon-fiber reinforced plastic (CFRP), to perform their task efficiently. The inspection by shearography is a non-destructive technique that uses laser interferometry to evaluate the integrity of these materials. Through shearography, bonding failures and delamination can be detected, indicating critical cases where intervention by the maintenance staff is required. However, the inspection of large areas coated with composite materials, is usually a slow and costly process. Thus, the use of a robotic system driven by cables to move a shearography system on the coated area is shown as a feasible alternative to reduce costs involved in the process and increase its productivity. This work presents the development of two shearography inspection systems. The first is a system that can be coupled to a cable-driven robot for total inspection of an area coated with composite material and the second a system for manual inspection in situations where it is not necessary to inspect all the coated area. The following tools were used for comparison and validation of the results obtained with the two systems: (a) a third inspection system previously validated by the inspections team of Labmetro/UFSC, (b) a specimen with artificially introduced defects and (c) a device developed to simulate the forces involved in a robotic system driven by cables. In tests, it was possible to detect the defects present in the specimen with equivalent results to the system used for comparison.

Keywords: Large inspection areas. Shearography. Composite materials. Non-destructive testing. Cable-driven robot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Revestimento de material compósito	33
Figura 2 - Aplicação de revestimento compósito em tubulação	34
Figura 3 - Delaminação em revestimento compósito.....	36
Figura 4 - Interferômetro de Michelson adaptado para shearografia	39
Figura 5 - Espalhamento da luz em uma superfície rugosa.....	40
Figura 6 - Exemplo de padrão de <i>speckles</i>	41
Figura 7 - Mapa de diferença de fases	44
Figura 8 - Módulos de um equipamento clássico de shearografia	45
Figura 9 - Aplicação de carregamento mecânico	46
Figura 10 - Aplicação de carregamento por vácuo	47
Figura 11 - Carregamento com câmara de vácuo.....	48
Figura 12 - Aplicação de carregamento térmico	49
Figura 13 - Aquecimento térmico aplicado no fundo de tanque	50
Figura 14 - Aplicação de carregamento vibracional	51
Figura 15 - Aplicação de carregamento vibracional com piezoelétricos.....	52
Figura 16 - Robô atuado por cabos IPAnema	54
Figura 17 - Esquemático robô atuado por cabos com quatro motores	54
Figura 18 - Área de medição de cada posição.....	56
Figura 19 - Fluxograma de procedimento de inspeção robotizada.....	57
Figura 20 - Módulo de aquisição de imagens	62
Figura 21 - Módulo de iluminação laser desenvolvido no Labmetro/UFSC.....	63
Figura 22 - Refletor para lâmpadas halógenas com base R7s lapiseira.....	65
Figura 23 - Módulo de controle e potência	66
Figura 24 - Refletor desenvolvido	67
Figura 25 - Vista lateral da estrutura.....	68
Figura 26 - Vista superior da estrutura.....	69
Figura 27 - Estrutura fabricada	69
Figura 28 - Suporte com ventosas e unhas ajustáveis	70
Figura 29 - Sistema de inspeção manual.....	71
Figura 30 - Circuito eletropneumático para acionamento das ventosas	72
Figura 31 - Componentes eletropneumáticos para acionamento das ventosas ..	73
Figura 32 - <i>Frame</i> de aço.....	74
Figura 33 - Roda omnidirecional	74
Figura 34 - Fixação com cilindros pneumáticos	75
Figura 35 - Sistema de inspeção robotizada.....	76
Figura 36 - Circuito eletropneumático para acionamento dos cilindros.....	77
Figura 37 - Componentes eletropneumáticos para acionamento dos cilindros ..	78
Figura 38 - Projeto de corpo de prova com defeitos artificiais	79
Figura 39 - Sequência de camadas do revestimento	80
Figura 40 - Aspecto do corpo de prova.....	81
Figura 41 - Ensaio com sistema de referência	82
Figura 42 - Resultado da medição com sistema de referência	83
Figura 43 - Ensaio com sistema de inspeção manual.....	85

Figura 44 - Resultado da medição com sistema de inspeção manual.....	86
Figura 45 - Esquemático do simulador de forças do robô.....	87
Figura 46 - Mecanismo simulador de forças do robô	88
Figura 47 - Sistema com cilindros recolhidos.....	89
Figura 48 - Ensaio com sistema de inspeção robotizada (cilindros acionados) ..	89
Figura 49 - Resultado da medição com sistema de inspeção robotizada	90
Figura 50 - Comparação dos resultados dos sistemas de inspeção	92
Figura 51 - Comparação dos tempos de inspeção	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Materiais classificados por fase e características	32
Quadro 2 - Principais tipos de defeitos, especificação e causa provável	35
Quadro 3 - Técnicas de END	37
Quadro 4 - Área visualizada em função do afastamento e lente utilizada.....	62
Quadro 5 - Diâmetro da área iluminada dada distância e quantidade de lentes ..	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais).
CFRP	<i>Carbon-fiber reinforced plastic</i> (Plástico reforçado com fibra de carbono).
DPSS	<i>Diode-pumped solid-state laser</i> (Laser diodo de estado sólido).
END	Ensaio não destrutivo.
FEESC	Fundação de Ensino de Engenharia de Santa Catarina.
GFRP	<i>Glass-fiber reinforced plastic</i> (Plástico reforçado com fibra de vidro)
INPETRO	Instituto de Petróleo, Gás e Energia.
Labmetro	Laboratório de Metrologia e Automatização.
P&G	Petróleo e Gás.
PRFC	Plástico reforçado com fibra de carbono
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
PRH34	Programa de Formação de Engenheiros nas Áreas de Automação, Controle e Instrumentação para a Indústria do Petróleo e Gás.
PZT	Atuador piezoelétrico.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Ponto na superfície iluminada.
P1, P2	Pontos lateralmente deslocados.
λ	Comprimento de onda.
δx	Distância entre dois pontos lateralmente deslocados.
I	Intensidade luminosa resultante da interferência entre dois pontos vizinhos.
I_0	Intensidade média ou de fundo.
γ	Modulação do termo de interferência.
φ	Diferença de fase entre pontos vizinhos que interferem entre si.
I'	Intensidade luminosa resultante após a deformação.
$\Delta\varphi$	Variação de fase em função ao carregamento aplicado ao objeto.
I_d^2	Quadrado da diferença entre as intensidades de cada ponto das imagens antes e após a aplicação do carregamento.
δL	Deslocamento do espelho móvel.
d	Distância de afastamento em relação à superfície.
f	Distância focal.
A	Área de visualização da câmera.
\emptyset	Diâmetro da área iluminada pelo módulo de iluminação.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 OBJETIVOS	30
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	31
2.1 TIPOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS	32
2.2 REVESTIMENTOS COM MATERIAIS COMPÓSITOS	33
2.3 DEFEITOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	34
2.4 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	36
3 SHEAROGRAFIA	39
3.1 PRINCÍCIOS DA SHEAROGRAFIA	39
3.1.1 <i>Speckle</i>	40
3.1.2 Diferença de fase	41
3.1.3 Deslocamento de fase	42
3.2 EQUIPAMENTO CLÁSSICO DE SHEAROGRAFIA	44
3.3 CARREGAMENTOS	45
3.3.1 Carregamento mecânico.....	45
3.3.2 Carregamento por vácuo.....	47
3.3.3 Carregamento térmico	48
3.3.4 Carregamento vibracional	50
4 APLICAÇÃO–ALVO: INSPEÇÃO ROBOTIZADA DE SUPERFÍCIES VERTICAIS	53
4.1 ROBÔ ATUADO POR CABOS	53
4.2 SISTEMA DE INSPEÇÃO	55
4.3 PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA	55
4.4 REQUISITOS DO SISTEMA DE INSPEÇÃO	58
5 CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE INSPEÇÃO.....	61
5.1 MÓDULOS PRÉ-EXISTENTES	61
5.1.1 Módulo de aquisição de imagens	61
5.1.2 Módulo de iluminação laser	63
5.1.3 Módulo de carregamento	64

5.1.4 Módulo de controle e potência	65
5.2 MÓDULOS DESENVOLVIDOS	67
5.2.1 Módulo de carregamento térmico	67
5.2.2 Módulo estrutural	68
5.3 SISTEMA DE INSPEÇÃO MANUAL	70
5.4 SISTEMA DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA	73
6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE INSPEÇÃO	79
6.1 CORPO DE PROVA	79
6.2 SISTEMA APOIADO SOBRE TRIPÉS	82
6.3 SISTEMA DE INSPEÇÃO MANUAL	84
6.4 SISTEMA DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA	87
6.5 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS	91
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
7.1 ASPECTOS POSITIVOS	95
7.2 LIMITAÇÕES	96
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos vêm sendo muito aplicados na indústria do petróleo e gás (P&G) como revestimentos e reparos de tubulações em geral, tanques de armazenamento e costados de navios. Estes materiais apresentam características como: elevada resistência mecânica e à corrosão e massa muito reduzida. Estas características podem ser obtidas e modificadas de acordo com os componentes utilizados em sua fabricação.

Os compósitos são uma excelente alternativa de revestimento anticorrosivo para costados de navios, dutos e tanques. Porém, quando aplicados em campo, muitas vezes em condições não ideais, podem apresentar defeitos internos como falta de adesão, bolhas de ar, delaminações, inclusões entre outros.

Defeitos comprometem as propriedades mecânicas do compósito e aumentam os riscos de acidentes, que geralmente são de grandes proporções em atividades de extração, refino e transporte de petróleo e derivados, causando prejuízos financeiros, ambientais e à vida humana. Assim, para assegurar a integridade dos revestimentos e minimizar os riscos dos acidentes que possam vir a ocorrer, é necessário que estes materiais sejam inspecionados.

Uma das técnicas de inspeção não destrutiva que vem sendo desenvolvida e aplicada nos últimos anos é a shearografia. Esta técnica óptica de inspeção tem apresentado excelentes resultados para detecção de defeitos como delaminações e bolhas de ar em materiais compósitos, tanto em laboratório quanto em campo (ALBERTAZZI, WILLEMANN e MENICONI, 2007).

Inspeções de grandes áreas verticais revestidas de material compósito, como em costados de navios e paredes de tanques, são operações de baixa produtividade e alto custo envolvido devido a fatores como: dificuldade de inspeção das superfícies verticais, dificuldade de atracar um sistema de inspeção no compósito, tamanho da área inspecionada, uso de sistemas manuais e com área de medição pequena, utilização de andaimes e pessoal capacitado.

Visando o aumento da produtividade de inspeção, e redução relativa de custos, a utilização de um sistema robotizado de movimentação por cabos mostra-se uma alternativa viável para movimentar um sistema de shearografia na região de interesse, automatizando assim as inspeções.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o aumento da produtividade de inspeção de grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos, através do desenvolvimento, avaliação e validação em laboratório de um sistema de medição por shearografia para utilização em conjunto com um robô atuado por cabos, e que além disso, com poucas adaptações, possa ser utilizado manualmente pelo operador para inspeção de áreas menores e específicas da superfície.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver e validar em laboratório um sistema de medição com shearografia que possa ser acoplado a um robô atuado por cabos, para inspeção de costados verticais de navios e tanques revestidos por materiais compósitos.
- Desenvolver e validar em laboratório um sistema de medição com shearografia para uso em inspeções manuais.
- Propor um procedimento de inspeção robotizada.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão teórica sobre materiais compósitos, incluindo alguns tipos de materiais, defeitos mais comuns e técnicas de inspeção desses defeitos.

No terceiro capítulo é abordada a shearografia, técnica óptica de inspeção utilizada neste trabalho. Serão abordados seus princípios básicos, configuração clássica e os tipos de carregamentos necessários ao seu funcionamento.

O quarto capítulo faz um apanhado geral da aplicação alvo deste trabalho que é a inspeção robotizada de superfícies verticais, abordando o robô atuado por cabos idealizado para este trabalho, as características e requisitos do sistema de inspeção, e o procedimento de inspeção proposto.

A concepção dos sistemas de inspeção é apresentada no quinto capítulo, detalhando os módulos que formam cada sistema, e apresentando os sistemas desenvolvidos.

A avaliação de desempenho dos sistemas de inspeção desenvolvidos é apresentada no capítulo sexto, assim como o corpo de prova utilizado nos ensaios e o sistema utilizado como referência para comparação dos resultados.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho, seguido pelas referências bibliográficas utilizadas.

2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais estão presentes em toda a evolução da espécie humana, desde a construção de ferramentas e utensílios à moradias e estruturas. A evolução em termos de tecnologia provocou a busca de materiais mais eficientes para atender às necessidades emergentes. Nas últimas décadas, a evolução dos setores de P&G, automotivo, químico e aeronáutico, tem motivado a demanda por materiais com propriedades incomuns que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas, nem por materiais poliméricos convencionais. Nesse contexto surgiram os materiais compósitos (PANTOJA, 2011).

Materiais compósitos ou apenas compósitos, são a combinação de dois ou mais materiais quimicamente diferentes, com interface distinta entre eles. Seus constituintes mantêm suas características próprias no compósito, mas sua combinação produz um material com propriedades diferentes de seus constituintes em individual (MALLICK, 1997; GAY, HOA e TSAI, 2003).

As principais características que podem ser melhoradas ao criar um material compósito são: resistência mecânica, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência à fadiga, resistência a altas temperaturas, massa, isolamento térmico, condutividade térmica e isolamento acústico. Todavia, nem todas as características podem ser otimizadas ao mesmo tempo, já que algumas estão em conflito com outras; como exemplo pode-se citar isolamento térmico e condutividade térmica (JONES, 1999).

Os compósitos são geralmente formados por duas fases, nas quais um de seus constituintes forma a fase contínua, chamada de matriz e outra parte de seus constituintes forma a fase dispersa (MALLICK, 1997; GAY, HOA e TSAI, 2003).

A matriz pode ser polimérica, metálica ou cerâmica. É mais comum a utilização de matrizes poliméricas, porém, em aplicações de alta temperatura são utilizadas com mais frequência matrizes metálicas e cerâmicas. Na fase dispersa são utilizados materiais fibrosos ou particulados que servem de reforço para o compósito (MALLICK, 1997; GAY, HOA e TSAI, 2003).

2.1 TIPOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

De acordo com Jones (1999), os materiais compósitos podem ser classificados como: fibrosos, laminados, particulados ou ainda uma combinação dos anteriores.

Os materiais compósitos fibrosos consistem da combinação de fibras à matriz que agregam ao compósito principalmente resistência mecânica. A concentração e orientação das fibras são fatores de alta influência para as propriedades destes compósitos, de forma que a melhor combinação de suas propriedades é obtida quando a distribuição das fibras é uniforme (CALLISTER JR, 2002).

Entre os tipos de fibras mais utilizados na indústria estão as fibras de carbono, aramida, poliéster, polipropileno e a fibra de vidro, que possui uma boa relação custo/benefício (MALLICK, 1997; LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Os materiais compósitos particulados são obtidos a partir da imersão de partículas de um ou mais materiais, metálicos ou não-metálicos, em uma matriz (JONES, 1999).

Os compósitos laminados consistem na junção de dois ou mais materiais em camadas. A laminação é uma maneira de combinar os melhores aspectos dos materiais que constituem cada camada, de acordo com a aplicação desejada (JONES, 1999).

A fabricação de um determinado material compósito deve ser realizada de acordo com os requisitos desejados, levando em conta as características individuais de cada constituinte. O quadro 1 apresenta uma compilação de alguns materiais classificados entre fase contínua e fase dispersa de acordo com suas características.

Quadro 1 - Materiais classificados por fase e características

Matriz (fase contínua)				Fase dispersa	
Cerâmicas	Metálicas	Poliméricas		Fibras	Particulados
		Termofixas	Termoplásticas		
Cerâmicas vítreas, carbono e carbetos de silício	Alumínio, cobre, magnésio e titânio	Resina epóxi, fenólica e poliuretano	Polipropileno, polietileno e poliamida	Fibras de carbono, aramida e vidro	Carbeto de silício, alumina e negro de fumo

Fonte: (MALLICK, 1997; CALLISTER JR, 2002; LEVY NETO e PARDINI, 2006)

2.2 REVESTIMENTOS COM MATERIAIS COMPÓSITOS

Os revestimentos com materiais compósitos são utilizados amplamente na indústria do P&G para providenciar proteção contra corrosão e reforço mecânico a diferentes tipos de estruturas como: chapas metálicas, tanques, costados de navios, superfícies de concreto, tubulações, entre outros. Geralmente utiliza-se plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) ou carbono (PRFC).

A aplicação de revestimentos compósitos em regiões críticas proporciona um aumento na vida útil do material revestido, muitas vezes sem a necessidade de substituir as partes degradadas, reduzindo custos e tempo das paradas de manutenção. Alguns revestimentos de fibra de vidro podem apresentar durabilidade superior a vinte anos (Grupo Rust Resinar, 2014).

Na figura 1 pode ser visualizado um revestimento aplicado na indústria de P&G.

Figura 1 - Revestimento de material compósito



Fonte: (Rust Engenharia, 2014)

Os revestimentos podem ser realizados no próprio local, muitas vezes não sendo necessário parar a produção para aplicação do mesmo. No entanto, essa abordagem permite que os revestimentos possam ser

aplicados em condições não ideais e venham a apresentar defeitos. Na figura 2 é possível visualizar a aplicação do revestimento em uma tubulação exposta aos efeitos ambientais.

Figura 2 - Aplicação de revestimento compósito em tubulação



Fonte: (Rust Engenharia, 2014)

2.3 DEFEITOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

No geral, os compósitos possuem maior susceptibilidade a defeitos que os materiais metálicos. Defeitos em materiais compósitos podem ser de diversos tipos como descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina. Esses podem ocorrer durante o processamento de matéria-prima, fabricação, manuseio, transporte, armazenamento, manutenção ou durante seu uso (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011).

O quadro 2 apresenta os principais tipos de defeitos que ocorrem em revestimentos com materiais compósitos e suas prováveis causas.

Quadro 2 - Principais tipos de defeitos, especificação e causa provável

Tipos	Especificação	Causa Provável
Bolha de ar	Retenção de ar dentro e entre as camadas de reforço.	Processo de fabricação inapropriado.
Delaminações	Falta de aderência entre camadas de compósitos laminados.	Preparação imprópria da superfície, excesso de catalisador, contaminação por materiais externos.
Descolamento	Separação da interface fibra-matriz	Falta de compatibilidade entre materiais ou pressão excessiva.
Fibras desalinhadas, rugosas e onduladas	Desvio da orientação do laminado em relação ao desejado.	Pressão não uniforme na cura, armazenamento inadequado, falta de compatibilidade entre materiais.
Fibras quebradas	Ocorrência de fratura da fibra que constitui o laminado.	Manuseio inapropriado, armazenamento indevido, sobrecarga/impacto.
Fratura	Ruptura da superfície do laminado sem penetração total.	Sobrecarga.
Inchaço	Alteração dimensional.	Absorção de umidade.
Inclusões	Introdução de partículas estranhas entre os laminados.	Limpeza inadequada das interfaces, contaminação da resina ou tecidos.
Lasca	Pequenos pedaços quebrados na superfície ou nas bordas do material.	Manuseio incorreto, impacto.
Porosidade	Bolsões de ar no interior do material.	Distribuição inadequada de pressão, pobre processo de controle.

Fonte: (MALLICK, 1997; SCHÖNTAG, 2009; LINS, 2012; SOUZA, 2012; CABRAL, 2014)

Além dos defeitos apresentados no quadro 2, os materiais compósitos podem ainda sofrer degradações ao serem expostos a efeitos ambientais, como radiação ultravioleta, temperatura e umidade (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011).

Na figura 3 pode ser visto um defeito de delaminação em um revestimento de material compósito.

Figura 3 - Delaminação em revestimento compósito



Fonte: (SOUZA, 2012)

Com o surgimento de defeitos no compósito, mesmo que não visíveis à inspeção visual, as estruturas revestidas por estes materiais podem estar fragilizadas, e susceptíveis a ocorrência de acidentes. Considerando a relevância dos acidentes relacionados à indústria de P&G, suas consequências financeiras, ambientais e à vida humana, é importante dispor de métodos eficazes para inspecionar e identificar esses defeitos, para que a ocorrência de acidentes seja evitada.

2.4 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

São muitas as técnicas de inspeção que podem ser utilizadas para detectar defeitos em materiais compósitos, dentre as quais há maior interesse nos ensaios não destrutivos (END), que consistem na inspeção sem ocasionar danos ao material que está sendo inspecionado.

Ensaos contribuem para a qualidade dos bens e serviços, preservação da vida e do meio ambiente, segurança de processos e

redução de custos, podendo ser executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção (ABENDI, 2014).

Os END estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos e são amplamente utilizados nos setores de P&G, aeroespacial, naval, eletromecânico, nuclear, automotivo, entre outros.

Para que sejam executados e obtenha-se resultados válidos e satisfatórios, é fundamental que os equipamentos estejam calibrados, disponha-se de pessoal qualificado e certificado, e que sejam executados de acordo com normas e critérios previamente estabelecidos.

Dentre as técnicas de END, as principais que podem ser utilizadas para inspeção de defeitos em materiais compósitos são apresentadas no quadro 3 com uma breve descrição.

Quadro 3 - Técnicas de END

Técnica de inspeção	Descrição
Emissão acústica	Deteção de descontinuidades através de ondas sonoras emitidas por um material em resposta a uma atuação térmica ou mecânica.
Ensaio visual	Ensaio a olho nu ou com auxílio de lupas e câmeras.
<i>Holiday detector</i>	Deteção de porosidades em revestimentos através da geração de faísca de alta tensão.
Holografia Eletrônica	Medição de deslocamento e identificação de anomalias no campo de deslocamentos sobre a área analisada.
Termografia	Medição de temperaturas através de captação de imagens e identificação de anomalias.
Ultrassom	Deteção de descontinuidades internas através da aplicação e reflexão de ondas acústicas no material.
Tomografia computadorizada	Avaliação de diferentes tipos de defeitos em diversos materiais através de radiação.

Fonte: (SOUZA, 2012)

Além destas, a shearografia é uma técnica de inspeção não destrutiva que vem sendo estudada nas últimas décadas, e tem se mostrado eficiente para deteção de defeitos em materiais compósitos, tanto em laboratório quanto em inspeções realizadas em campo (ALBERTAZZI *et al.*, 2006; STEINCHEN e YANG, 2003). Esta técnica será abordada com maior detalhamento no item 3.

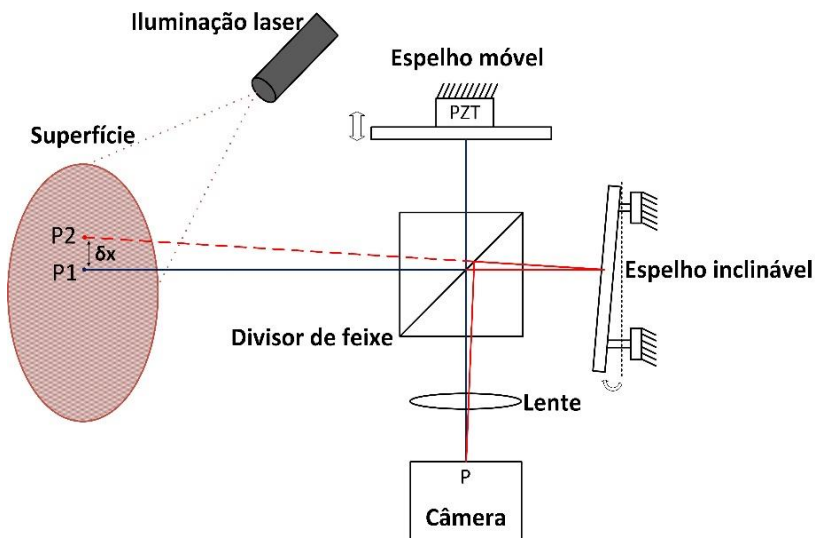
3 SHEAROGRAFIA

3.1 PRINCÍCIOS DA SHEAROGRAFIA

O termo shearografia vem do inglês *shearography*. *Graphy* significa “registro de” e *shear* significa “cisalhamento”, ou “deslocamento lateral”. A shearografia é uma técnica óptica de medição de deformações na superfície de interesse. Sua principal vantagem é a capacidade de operar fora do ambiente de laboratório pois apresenta menor sensibilidade a vibrações e deslocamentos de corpo rígido e possui configuração óptica mais simplificada em relação à outras técnicas interferométricas de medição (HUNG e HO, 2005; ALBERTAZZI, WILLEMANN e MENICONI, 2007).

O arranjo óptico utilizado para a shearografia pode ser inspirado em uma variante do interferômetro de “Michelson” apresentado na figura 4, composto por um espelho móvel, um espelho inclinável, um divisor de feixe e uma câmera. A interferência é obtida entre a imagem original da superfície medida com outra imagem, da mesma superfície, lateralmente deslocada.

Figura 4 - Interferômetro de Michelson adaptado para shearografia



Fonte: Próprio autor

O deslocamento lateral é aplicado manualmente por meio de uma mesa óptica que gira suavemente o espelho em torno do eixo vertical e/ou horizontal, como visto na parte direita da figura 4. A interferência ocorre no CCD da câmera. Os feixes vêm de dois pontos, P1 e P2, que estão na superfície do objeto. Ao passar pelo divisor e espelhos, os feixes (vindos de P1 e P2) se combinam e interferem em apenas um ponto do CCD.

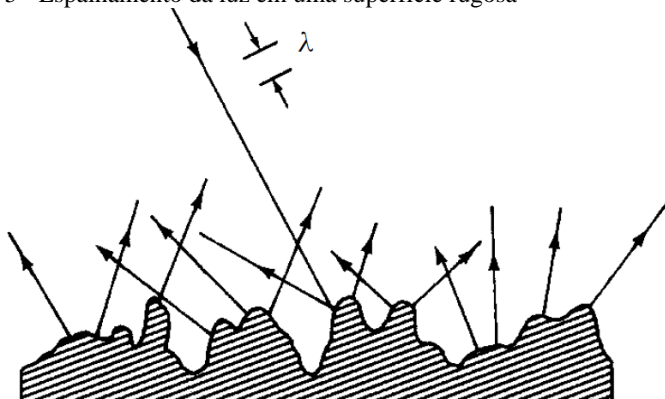
Para o entendimento da técnica de shearografia, são importantes os conceitos de *speckle*, diferença de fase e deslocamento de fase.

3.1.1 *Speckle*

O princípio de Huygens assume que cada ponto em uma frente de onda em propagação age como uma nova fonte de ondas secundárias (HECHT, 2002). Desta forma, quando uma superfície é iluminada pela luz coerente de um laser, cada ponto na superfície pode ser considerado como uma pequena fonte de ondas que segue o princípio de Huygens (VIOTTI e ALBERTAZZI JR., 2014).

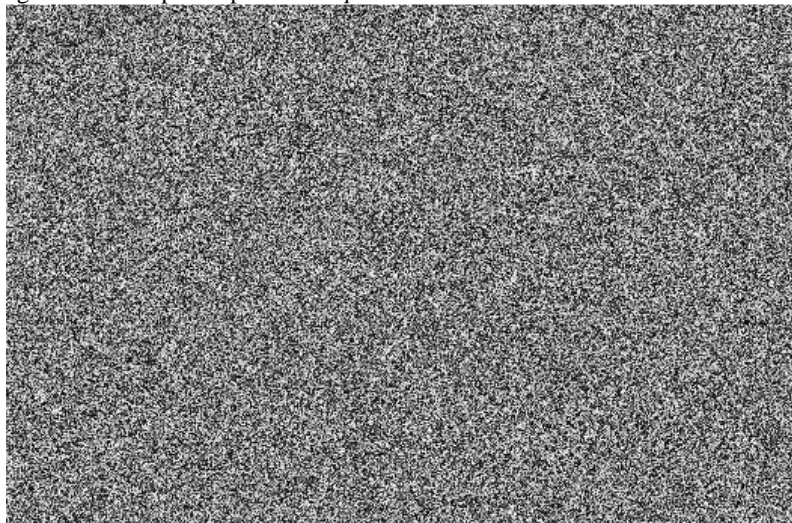
O efeito *speckle* é percebido ao iluminar uma superfície rugosa com um laser de comprimento de onda (λ) menor que a rugosidade da superfície em questão (figura 5). A luz refletida pela superfície rugosa será espalhada de forma aleatória em todas as direções devido o princípio de Huygens, resultando em regiões localizadas onde predominam interferências construtivas ou destrutivas da luz, formando um granulado óptico aleatório contendo pontos claros e escuros respectivamente, denominado padrão de *speckles* (GOODMAN, 1976; MOHAN, 2008), como pode ser visto na figura 6.

Figura 5 - Espalhamento da luz em uma superfície rugosa



Fonte: (GASVIK, 2002)

Figura 6 - Exemplo de padrão de *speckles*



Fonte: Próprio autor

3.1.2 Diferença de fase

Ainda considerando a figura 4, a câmera recebe informação de um grande conjunto de pares de pontos vizinhos da superfície, distantes δx entre si, formando uma área de interferência de duas regiões da superfície; esta é a área de medição (STEINCHEN e YANG, 2003). Nela, ocorre a superposição de regiões diferentes do padrão de *speckle*, que interferem mutuamente, dando origem a um novo padrão de *speckle* resultante da interferência, chamado de specklegrama.

Na shearografia a detecção de falhas acontece através das diferenças do ângulo de fase em cada ponto do specklegrama, que por sua vez não podem ser medidas diretamente pela câmera. Sua medição é realizada de forma indireta por meio das variações da intensidade luminosa captada por cada pixel no sensor da câmera.

A intensidade luminosa de cada pixel do CCD da câmera resultante da interferência entre dois pontos vizinhos pode ser calculada pela equação 1.

$$I = 2I_0(1 + \gamma \cos \varphi) \quad (1)$$

Onde I_0 é a intensidade média ou de fundo, γ é a modulação do termo de interferência, e φ é a diferença de fase dos pontos vizinhos que

interferem e estão afastados de uma quantidade igual ao deslocamento lateral δx (STEINCHEN e YANG, 2003).

Quando um objeto é deformado devido à aplicação de um carregamento, ocorre uma variação da diferença de fase $\Delta\varphi$ devido aos deslocamentos dos pontos da superfície do objeto em questão. A intensidade luminosa resultante após a deformação, pode ser calculada a partir da equação 2 (STEINCHEN e YANG, 2003).

$$I' = 2I_0[1 + \gamma \cos(\varphi + \Delta\varphi)] \quad (2)$$

Onde $\Delta\varphi$ é a variação do ângulo de fase em função ao carregamento aplicado ao objeto. Um padrão de franjas correspondentes à deformação do objeto surge ao calcular o quadrado da diferença (I_d^2) entre as intensidades de cada ponto das imagens antes e após a aplicação do carregamento (equação 3). Serão obtidos valores positivos nos pontos que possuírem diferença (pontos claros) e zero nos pontos que não apresentarem variação de intensidade (pontos escuros).

$$I_d^2 = (I - I')^2 = \left(4I_0 \left[\sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\frac{\Delta\varphi}{2} \right] \right)^2 \quad (3)$$

Como o valor de intensidade é dependente de I_0 , γ e φ , para se obter apenas os valores referentes à variação da fase $\Delta\varphi$ é necessária a aplicação de artifícios matemáticos adicionais (STEINCHEN e YANG, 2003), como por exemplo a técnica de deslocamento de fase apresentada no item 3.1.3.

3.1.3 Deslocamento de fase

A técnica do deslocamento de fase é baseada no acréscimo de um valor bem conhecido no ângulo de fase dos pontos que interferem entre si. Para isso, pode ser utilizado um atuador formado por um cristal piezoelétrico (PZT) para deslocar linearmente, e de maneira controlada, o espelho móvel do interferômetro, que pode ser visto na parte superior da figura 4.

Com o deslocamento linear do espelho em uma quantidade δL , o caminho óptico é alterado de $2\delta L$ e, desta forma, a alteração causada na fase φ pode ser calculada pela equação 4 (STEINCHEN e YANG, 2003).

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\delta L \quad (4)$$

A partir disso, o cálculo da fase pode ser realizado, por exemplo, com a utilização do método dos cinco passos desenvolvido por Hariharan, Oreb e Eiju (1987). São adquiridas cinco imagens defasadas de $\pi/2$ entre si, resultando no valor de intensidade para cada pixel da imagem de acordo com as equações 5 a 9 (HARIHARAN, OREB e EIJU, 1987).

$$I_1 = 2I_0 [1 + \gamma\cos(\varphi - \pi)] \quad (5)$$

$$I_2 = 2I_0 \left[1 + \gamma\cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (6)$$

$$I_3 = 2I_0 [1 + \gamma\cos(\varphi)] \quad (7)$$

$$I_4 = 2I_0 \left[1 + \gamma\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (8)$$

$$I_5 = 2I_0 [1 + \gamma\cos(\varphi + \pi)] \quad (9)$$

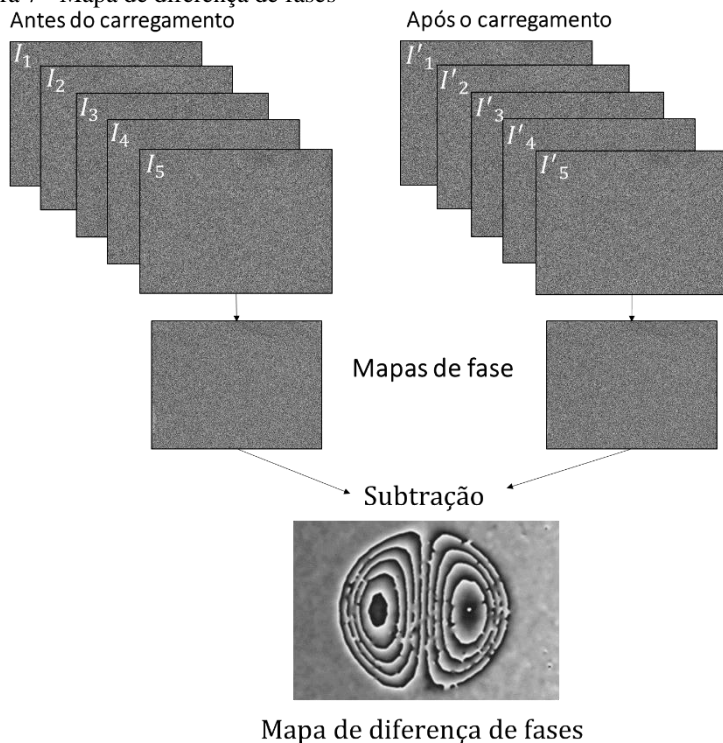
Utilizando os valores de intensidades I_1 a I_5 na equação 10, é determinado o valor de fase φ em cada ponto da imagem (HARIHARAN, OREB e EIJU, 1987).

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (10)$$

Desta forma é obtido um mapa de fases formado pelo conjunto de valores de fase de todos os pixels da imagem. Apresenta-se de forma totalmente aleatória, sem que nenhum padrão visual seja perceptível. Por outro lado, a imagem resultante da subtração entre os mapas de fase do estado inicial (sem carregamento) e após a aplicação do carregamento apresenta um padrão semelhante ao das franjas de interferência e é denominado de mapa de diferença de fases (STEINCHEN e YANG, 2003).

Na figura 7 é ilustrada a sequência aplicada no algoritmo dos 5 passos que resulta no mapa de diferença de fases entre os estados antes e após carregamento.

Figura 7 - Mapa de diferença de fases



Fonte: Próprio autor

3.2 EQUIPAMENTO CLÁSSICO DE SHEAROGRAFIA

O equipamento clássico para inspeções com shearografia é composto por um módulo de iluminação laser, módulo de aquisição de imagens, módulo de carregamento e um programa de computador especializado que roda em um computador portátil (WILLEMANN *et al.*, 2008).

O módulo de iluminação é responsável por iluminar a superfície em análise e é composto por uma fonte de luz laser e um conjunto de lentes para expansão do feixe. O módulo de aquisição de imagens contém basicamente um conjunto de lentes, um interferômetro e uma câmera para captar as imagens da superfície em questão.

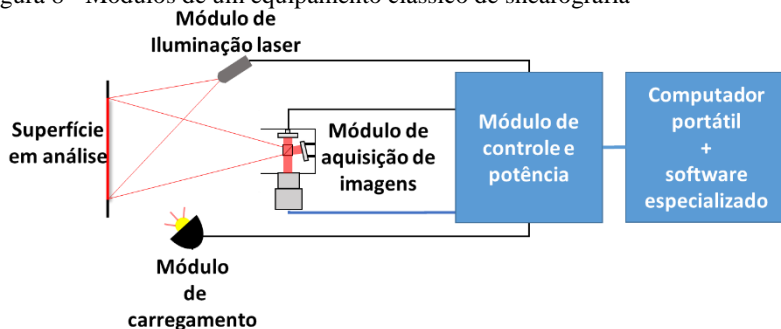
O módulo de carregamento é utilizado para aplicar um estímulo na superfície a medir, provocando uma pequena deformação na mesma. Esse

módulo depende do tipo de carregamento utilizado, e será abordado no item 3.3.

Adicionalmente, o equipamento clássico de shearografia possui módulos de controle e potência, contendo *drivers* para comando do laser e do PZT, sendo também responsável pela interface *hardware-software* do equipamento de inspeção.

Na figura 8 é possível visualizar um desenho esquemático dos componentes de um equipamento clássico de shearografia.

Figura 8 - Módulos de um equipamento clássico de shearografia



Fonte: Próprio autor

3.3 CARREGAMENTOS

Para a utilização da shearografia como técnica de inspeção, é necessária a aplicação de uma ou mais formas de carregamento no objeto a ser medido para que os defeitos sejam detectados (HUNG e HO, 2005). Em resposta ao carregamento aplicado é possível perceber, através das franjas de interferência, a presença de defeitos nos materiais compósitos.

A escolha do carregamento e de sua intensidade depende do material, tipo e extensão do defeito a detectar e de aspectos operacionais de cada caso (ALBERTAZZI *et al.*, 2006). Para evidenciar os defeitos, é comum serem aplicados quatro tipos básicos de carregamentos: mecânico, térmico, por vácuo ou vibracional. Estes carregamentos podem ser aplicados também de forma combinada entre si, como por exemplo, vácuo e térmico.

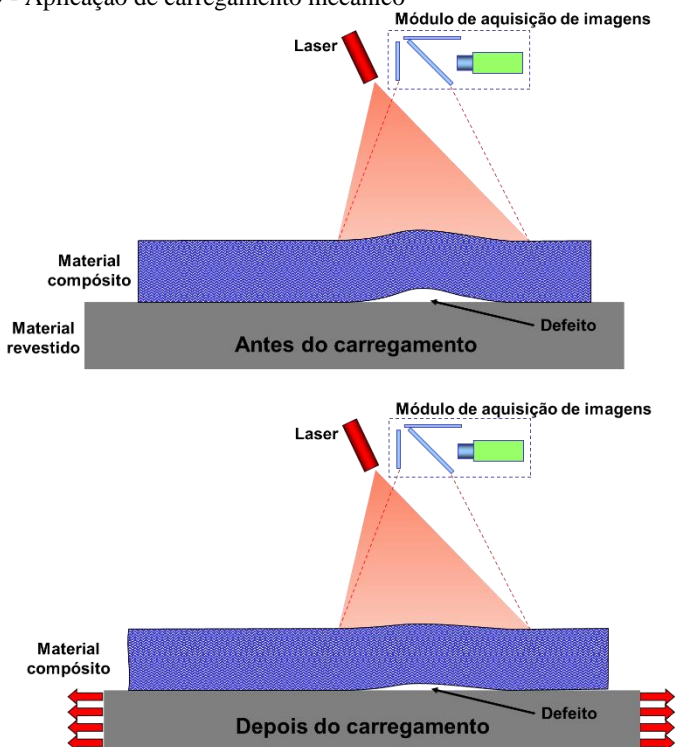
3.3.1 Carregamento mecânico

O carregamento mecânico consiste na aplicação de níveis controlados de tração, flexão, torção e/ou, quando possível, variação da

pressão interna no material a ser inspecionado. Com a aplicação de um carregamento mecânico sobre materiais compósitos estes tendem a apresentar campos de deformações relativamente uniformes em regiões não defeituosas. Porém, na existência de defeitos no compósito, são geradas concentrações de tensões que dão origem a anomalias nos campos de deformações e estas são detectadas pela shearografia (ALBERTAZZI *et al.*, 2006).

Na figura 9, as setas ilustram a aplicação de tração em uma superfície metálica revestida por material compósito. Durante a aplicação do carregamento de tração, a região que apresenta defeitos não acompanhará a deformação do material revestido da mesma forma que a região sem defeitos (bem aderida) acompanha. Isto faz com que os campos de deformação nas regiões com e sem defeito sejam diferentes, provocando anomalias nos padrões de franjas ao serem inspecionados pela shearografia.

Figura 9 - Aplicação de carregamento mecânico

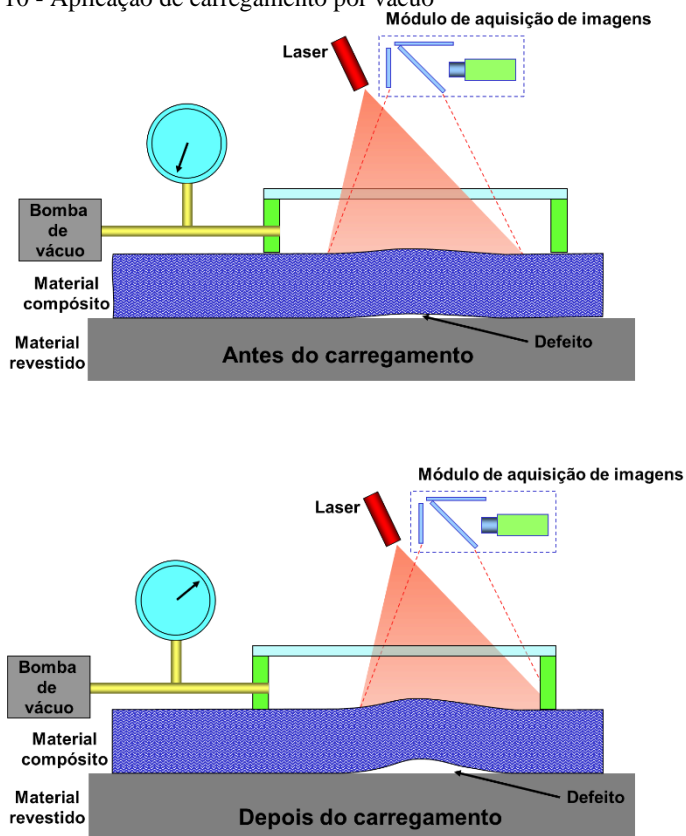


Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI *et al.*, 2006)

3.3.2 Carregamento por vácuo

Consiste na aplicação de pressão negativa na superfície revestida pelo material compósito. As partes do revestimento que apresentarem falha tendem a expandir diferentemente das partes onde existe melhor adesão no material revestido. Desta forma, as regiões defeituosas são detectadas pela shearografia. Uma ilustração da aplicação do carregamento por vácuo pode ser visualizada na figura 10.

Figura 10 - Aplicação de carregamento por vácuo

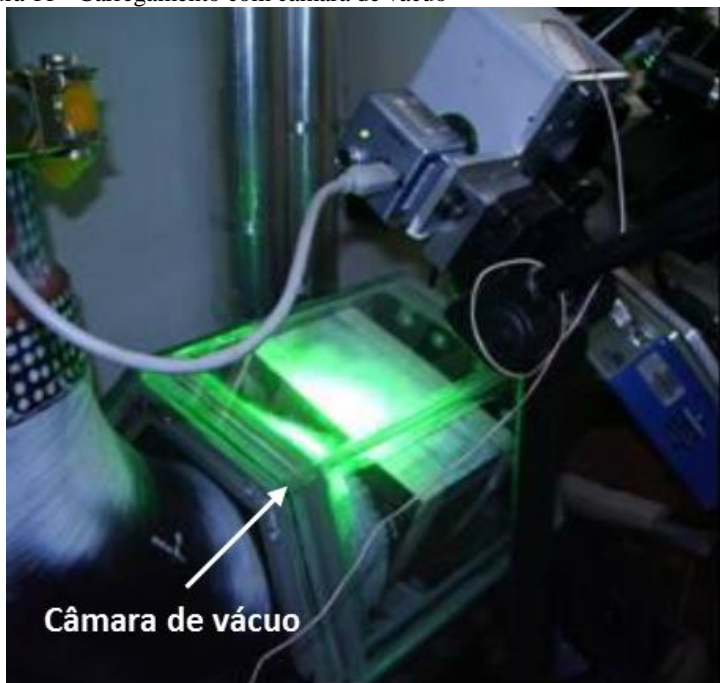


Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI *et al.*, 2006)

Para a aplicação do carregamento com vácuo, é necessária a utilização de câmaras estanques. Estas câmaras podem envolver apenas a região de interesse ou toda a estrutura a ser inspecionada. A figura 11

mostra a aplicação do carregamento utilizando-se uma câmara de vácuo com janela de vidro, para a iluminação e visualização da superfície inspecionada.

Figura 11 - Carregamento com câmara de vácuo

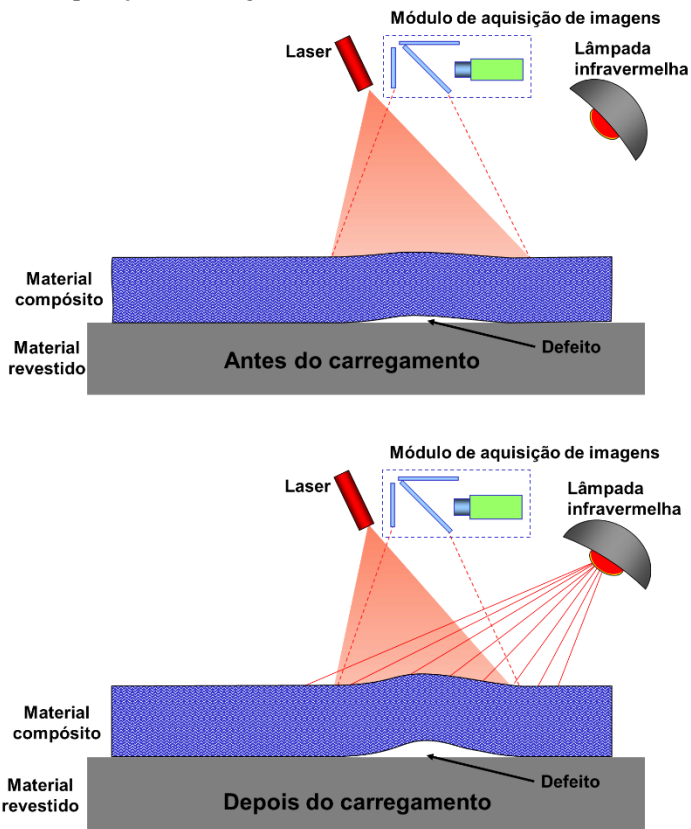


Fonte: Adaptado de (WILLEMAN *et al.*, 2011)

3.3.3 Carregamento térmico

Com a aplicação de calor, o material compósito tende a expandir devido à dilatação térmica. Na ausência de defeitos, o campo de deformações provocado pela variação de temperatura é relativamente uniforme. Porém, na existência de algum defeito entre camadas, ou falhas de adesão entre o revestimento e o material revestido, o campo de deformações apresenta descontinuidades. Nos locais que apresentam uma boa adesão, a deformação térmica do compósito acompanha a deformação do material revestido e permanece uniforme, enquanto na região com falha de adesão, o compósito está livre para expandir e apresenta um campo de deformações diferente daquele da região sã (ALBERTAZZI *et al.*, 2006), conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12 - Aplicação de carregamento térmico



Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI *et al.*, 2006)

O aquecimento pode ser aplicado através de lâmpadas emissoras de radiação infravermelha, aquecedores elétricos ou sopradores térmicos. O tempo de aquecimento depende da espessura do revestimento, da profundidade do defeito, do tipo de material composto e da potência do sistema térmico, mas geralmente o tempo de aquecimento é menor que 1 minuto.

O carregamento térmico é bastante empregado em campo e a grande vantagem da sua utilização é a facilidade de aplicação (posicionamento, ajuste de intensidade, tempo de exposição e alcance do carregamento) (PAES, 2013).

A figura 13 mostra a aplicação de carregamento térmico no fundo de um tanque através de uma lâmpada.

Figura 13 - Aquecimento térmico aplicado no fundo de tanque

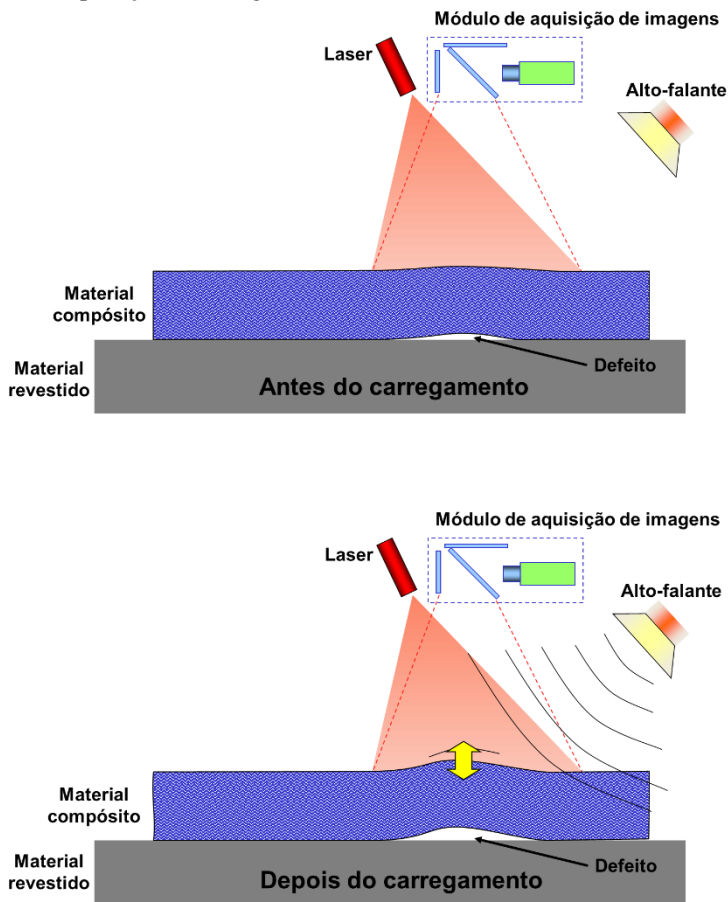


Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2012)

3.3.4 Carregamento vibracional

Alguns tipos de defeitos em materiais compósitos podem ser detectados através do carregamento vibracional, que consiste na excitação do material através de atuadores piezoelétricos ou alto-falantes. Os defeitos são geralmente o descolamento das camadas de uma região do compósito que tendem a se comportar como uma espécie de membrana em resposta à vibração. Se esta membrana é excitada em sua frequência de ressonância, sua vibração deverá ser intensa e distinta da região em que não existe defeito, possibilitando a detecção de defeitos pelo sistema de inspeção (SCHÖNTAG, WILLEMANN e ALBERTAZZI, 2010), como ilustra a figura 14.

Figura 14 - Aplicação de carregamento vibracional



Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI *et al.*, 2006)

A frequência de ressonância e amplitude para detecção de cada defeito depende do tipo de material, tamanho do defeito e sua profundidade. Para identificar a frequência de ressonância para cada defeito, é realizada uma varredura de frequências em toda a superfície em medição. A figura 15 mostra dois atuadores piezoelétricos utilizados para aplicação do carregamento vibracional em um duto revestido com material compósito.

Figura 15 - Aplicação de carregamento vibracional com piezoelétricos



Fonte: (PAES e SILVA, 2010)

4 APLICAÇÃO-ALVO: INSPEÇÃO ROBOTIZADA DE SUPERFÍCIES VERTICAIS

Atualmente, para inspeção por shearografia de superfícies verticais e costados de navios revestidos por materiais compósitos, é utilizado um equipamento de medição montado sobre um tripé com ventosas para a sua fixação sobre o revestimento. Para ter acesso ao revestimento, pode ser necessária a utilização de andaimes que possuem alto custo de instalação e demandam muito tempo para montagem.

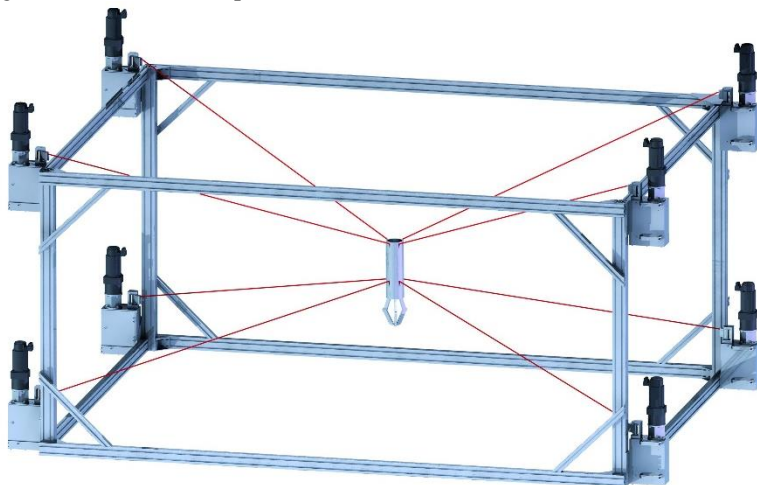
Com o intuito de aumentar a velocidade de inspeção de grandes áreas verticais, é possível utilizar um sistema automatizado para movimentar e fixar nas regiões verticais de interesse um dispositivo de inspeção por shearografia, diminuindo o tempo total de inspeção.

Este trabalho considera a utilização de um sistema robotizado atuado por cabos com movimentação em duas dimensões, de acordo com o escopo do projeto SHIC2 financiado pela Petrobras.

4.1 ROBÔ ATUADO POR CABOS

A utilização de robôs atuados por cabos é uma inovação para o manuseio de objetos e para realização de tarefas com características específicas. Suas principais vantagens em relação aos sistemas robóticos convencionais são: grande área de trabalho, alta velocidade em deslocamentos, boa precisão e baixo consumo energético (FRAUNHOFER-IPA, 2011). A figura 16 mostra um robô conceito, de oito motores com oito cabos, desenvolvido no instituto Fraunhofer de Stuttgart - Alemanha.

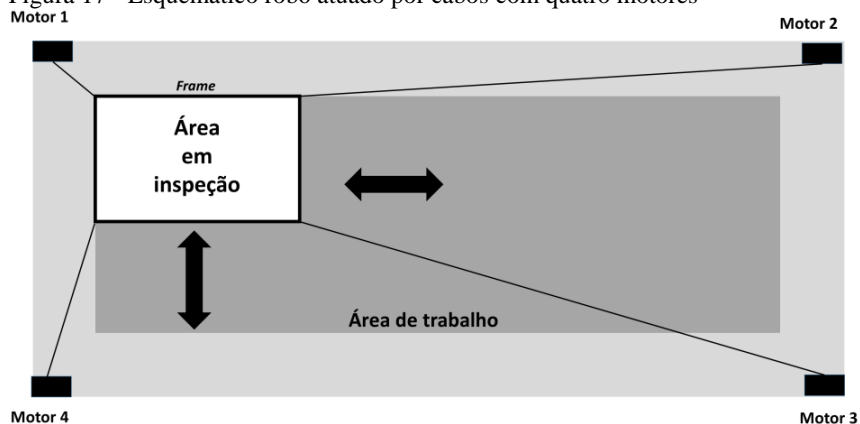
Figura 16 - Robô atuado por cabos IPAnema



Fonte: (FRAUNHOFER-IPA, 2011)

O robô atuado por cabos idealizado para a inspeção de paredes verticais com shearografia no contexto do projeto SHIC2 consiste em um sistema de quatro motores com carretéis e dispostos de forma retangular sobre a superfície vertical. Cada motor atua de forma sincronizada para enrolar, desenrolar ou parar cabos de aço, cujas extremidades estão presas a uma estrutura retangular móvel (*frame*), como pode ser visto no esquemático da figura 17.

Figura 17 - Esquemático robô atuado por cabos com quatro motores



Fonte: Próprio autor

Acoplado ao *frame*, um dispositivo de inspeção por shearografia é movimentado e posicionado em qualquer ponto dentro da área de trabalho do robô de acordo com as movimentações de cada um dos quatro motores.

A área de movimentação e instalação do robô pode ser estabelecida de acordo com a demanda da superfície a ser inspecionada. No escopo do projeto SHIC2 foi estimada em aproximadamente 3,5 m de altura por 6,0 m de comprimento e estará sendo construída no Instituto de Petróleo, Gás e Energia (INPETRO) ao longo do ano de 2015.

4.2 SISTEMA DE INSPEÇÃO

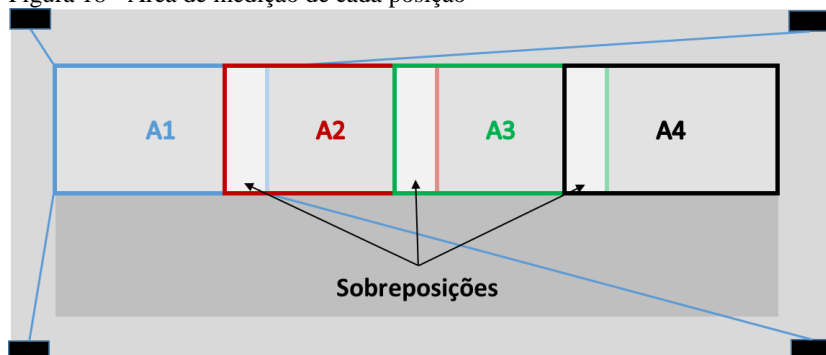
O sistema de inspeção a ser utilizado em conjunto com o robô atuado por cabos idealizado para este trabalho, deve conter uma estrutura mecânica que possa ser acoplada ao *frame* e suporte os módulos de iluminação laser, aquisição de imagens e carregamento que compõem o sistema de inspeção com shearografia. Além disso, são necessários: um dispositivo para atracar o sistema de shearografia na superfície revestida mantendo-o fixo durante a medição, e um dispositivo que possibilite o deslocamento do sistema sobre a superfície do compósito. Os detalhes construtivos deste sistema serão detalhados no item 5.

4.3 PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA

Para realização da inspeção de toda a área de trabalho do robô, várias medições precisam ser realizadas e concatenadas, visto que os módulos de iluminação e aquisição de imagens do sistema de shearografia não são capazes de abranger toda a área inspecionada em uma única tomada de imagem. Atualmente, o sistema de shearografia é capaz de abranger áreas de aproximadamente 515 x 400 mm² quando colocado a uma distância de 300 mm da superfície de interesse. Após a realização da medição da área de uma posição, o robô reposiciona o sistema, mede a área contígua, e assim sucessivamente, formando um mosaico até abranger toda a área de trabalho do robô.

É importante medir as extremidades das áreas com sobreposição de alguns milímetros para que, após o término da inspeção, possa ser montado um mosaico com os resultados de todas as posições medidas, sem perdas ou descontinuidades nas bordas das áreas medidas. A figura 18 exemplifica a sobreposição das áreas numeradas de A1 - A4 referentes à medição de cada posição.

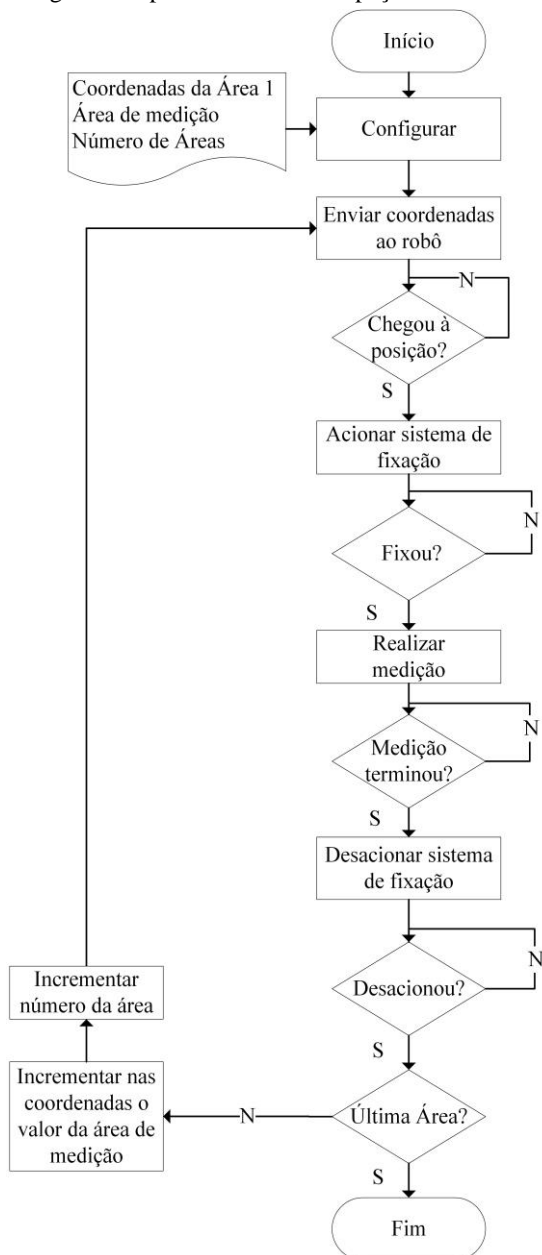
Figura 18 - Área de medição de cada posição



Fonte: Próprio autor

Com o sistema de inspeção preso aos cabos do robô e após a conexão dos equipamentos necessários, a realização da inspeção pode ser realizada conforme o fluxograma proposto na figura 19.

Figura 19 - Fluxograma de procedimento de inspeção robotizada



Fonte: Próprio autor

4.4 REQUISITOS DO SISTEMA DE INSPEÇÃO

Em conjunto com a equipe de robótica do departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, foram analisadas as características e limitações do robô atuado por cabos para o desenvolvimento do sistema de inspeção com shearografia a ser utilizado em conjunto com o robô.

De acordo com questões operacionais do robô e viabilidade de aplicação, a massa máxima a ser movimentada pelos cabos do robô foi definida em 15 kg, com um *frame* de dimensões máximas de 1 m por 1 m para acoplar às extremidades dos cabos e o afastamento máximo em relação à superfície de trabalho de 500 mm.

Baseando-se em inspeções com shearografia realizadas em campo, foi definido como alvo que a área inspecionável por cada posicionamento seja de pelo menos 300 x 300 mm².

A estrutura mecânica e seus componentes devem suportar as forças transmitidas pelo sistema robotizado. O acoplamento dos módulos de shearografia à estrutura mecânica do sistema de inspeção deve ser rígido, de forma a não danificar ou desalinhar componentes durante a movimentação do conjunto.

Em função da movimentação, a estrutura deve conter algum tipo de roda ou material deslizante que possibilite seu deslocamento sem danificar o revestimento de material compósito, nem a estrutura.

Durante a aquisição das imagens, vibrações e movimentos relativos entre a estrutura e a superfície inspecionada são prejudiciais à medição, causando ruído na imagem ou até impossibilitando a inspeção. Desta forma, é muito importante dispor de um mecanismo para a fixação da estrutura mecânica no revestimento de material compósito durante a medição que evite vibrações e movimentações indesejadas no sistema.

É relevante que o sistema seja modular para que possa ser facilmente desmontado, facilitando assim o transporte e a realização de manutenção dos seus componentes.

Desta forma, os requisitos do sistema de inspeção são:

- Modularidade.
- Resistência mecânica.
- Acoplamentos rígidos dos módulos à estrutura.
- Possibilidade de ser movimentado sem danificar o revestimento.
- Fixação à superfície durante a medição.
- Massa máxima de 15 kg.

- Afastamento máximo de 500 mm em relação à superfície em análise.
- Dimensão máxima do *frame* de 1 m por 1 m.
- Área de medição igual ou superior a 300 x 300 mm².

5 CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE INSPEÇÃO

Foram desenvolvidos dois sistemas de inspeção, sendo um deles para inspeções manuais, e outro para futura utilização em conjunto com um robô atuado por cabos. Seus componentes em comum são divididos em módulos, facilitando a manutenção e transporte dos sistemas de inspeção.

Em ambos os sistemas foram usados módulos pré-existent de controle e potência, iluminação e aquisição de imagens, descritos no item 5.1. Além disso, foi desenvolvido um módulo estrutural, composto por uma estrutura mecânica para o acoplamento dos módulos supracitados, e um módulo de carregamento térmico com dimensões compatíveis com os demais módulos utilizados. Os módulos desenvolvidos são descritos no item 5.2.

5.1 MÓDULOS PRÉ-EXISTENTES

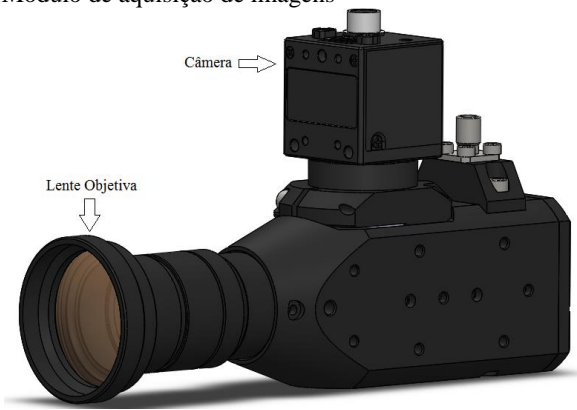
Para satisfazer os requisitos do sistema de inspeção, levando-se em conta os equipamentos necessários para inspeção com shearografia, foram selecionados os módulos de aquisição de imagens, iluminação laser, carregamento e de controle e potência.

5.1.1 Módulo de aquisição de imagens

Na montagem do sistema de inspeção com shearografia, foi utilizado o módulo de aquisição de imagens N4F, desenvolvido no Labmetro/UFSC e largamente testado por Cabral (2014), devido a sua ampla área de visualização e por ter seus resultados de medição validados.

Esse módulo, apresentado na figura 20, possui dimensões aproximadas de 160 mm de comprimento, 40 mm de largura e 90 mm de altura com massa total de 500 g.

Figura 20 - Módulo de aquisição de imagens



Fonte: Próprio autor

Seu interior contém um interferômetro de Michelson adaptado para shearografia, composto por uma base de alinhamento em que estão acoplados um divisor de feixe, dois espelhos de primeira superfície, sendo um deles acoplado a um PZT para realizar o deslocamento de fase. Acoplada a um dos espelhos, existe uma pequena mesa óptica que possibilita rotações em dois eixos, e efetua o deslocamento lateral das imagens em duas direções ortogonais (CABRAL, 2014).

A área visualizada pelo módulo é dependente do seu afastamento da superfície de interesse e das lentes objetivas utilizadas em sua configuração. O afastamento é medido a partir da lente objetiva em relação a superfície visualizada. O quadro 4 mostra as diferentes áreas visualizadas em função da distância de afastamento (d) e das lentes objetivas com diferentes distâncias focais (f) utilizadas no módulo.

Quadro 4 - Área visualizada em função do afastamento e lente utilizada

Distância[mm]	$f = 3,5$[mm]	$f = 5,0$[mm]	$f = 8,0$[mm]
1000	1600x1205 mm ²	1180x895 mm ²	730x540 mm ²
1100	1755x1320 mm ²	1295x980 mm ²	800x590 mm ²

Fonte: Adaptado de (CABRAL, 2014)

A lente objetiva escolhida foi a de distância focal de 3,5 mm, pois apresentou uma área maior de visualização para um mesmo afastamento em relação à superfície. A área de visualização (A) do módulo selecionado pode ser obtida pela equação 11 construída a partir dos dados do quadro 4.

$$A [mm^2] = (1,55d + 50) \times (1,15d + 55) \quad (11)$$

Assim, de acordo com equação 11, foi determinada a utilização de uma área de visualização da câmera de aproximadamente 515 x 400 mm², em função de um afastamento (d) de cerca de 300 mm em relação à superfície visualizada.

5.1.2 Módulo de iluminação laser

O módulo de iluminação laser selecionado (figura 21) foi desenvolvido no Labmetro/UFSC e possui dimensões aproximadas de 100 mm de comprimento, 17 mm de largura e massa de aproximadamente 200 g. As principais vantagens da utilização deste módulo de iluminação em relação a outros sistemas comerciais são: massa reduzida, baixo custo e boa capacidade de expansão do feixe.

Figura 21 - Módulo de iluminação laser desenvolvido no Labmetro/UFSC



Fonte: Próprio Autor

Neste módulo podem ser utilizadas uma ou duas lentes para expansão do feixe de um laser de estado sólido (DPSS) com comprimento de onda nominal de 532 nm e potência nominal de 40 mW. O quadro 5 apresenta os dados de expansão do feixe em função das lentes empregadas e da distância ao revestimento.

Quadro 5 - Diâmetro da área iluminada dada distância e quantidade de lentes

Distância [mm]	Ø uma lente [mm]	Ø duas lentes [mm]
130	85	160
180	115	220

Fonte: (CABRAL, 2014)

Por apresentar maior expansão, foi utilizado o módulo com duas lentes. A partir dos dados do quadro 5 pode ser construída a equação 12, que resulta no diâmetro da área iluminada pelo módulo com duas lentes em função da distância do módulo de iluminação ao revestimento (d).

$$\varnothing [mm] = 1,2d + 4 \quad (12)$$

Com a utilização da equação 12, e com a distância de afastamento entre o módulo e a superfície revestida (aproximadamente 300 mm), é possível determinar o diâmetro de expansão do laser como 364 mm, fazendo-se necessário o uso de quatro módulos de iluminação para a cobertura da área de medição proposta de 515 x 400 mm².

Com a utilização de duas lentes para expansão, a área iluminada é aumentada, implicando na diminuição da intensidade luminosa do laser. Em função disso, a medição em ambientes com excesso de luz, como por exemplo inspeções em campo, pode ser dificultada. Para amenizar problemas oriundos do excesso de luz branca, utiliza-se no módulo de aquisição de imagens um filtro de interferência passa-bandas específico para o comprimento de onda do laser (CABRAL, 2014).

5.1.3 Módulo de carregamento

Em função de sua massa reduzida em relação aos outros métodos de carregamento, facilidade de instalação e aplicação, foi implementado nesse módulo o carregamento térmico.

Para aplicações com shearografia, dependendo do tipo de revestimento, espessura e profundidade do defeito, pode ser necessário aplicar uma diferença maior ou menor de temperatura para evidenciar a falha. Foram realizados testes com refletores e lâmpadas halógenas tipo R7s (figura 22) de 150 W, 300 W e 500 W em um corpo de prova com dimensões de 180 mm por 120 mm, com a utilização de uma termocâmera para monitoramento da temperatura.

Constatou-se que com a utilização de um refletor de maior potência, é possível aplicar uma diferença maior de temperatura em um

intervalo menor de tempo, contribuindo para a diminuição do tempo da inspeção. Desta forma, foi selecionado um refletor com lâmpada de 500 W para aplicação do carregamento.

Figura 22 - Refletor para lâmpadas halógenas com base R7s lapiseira



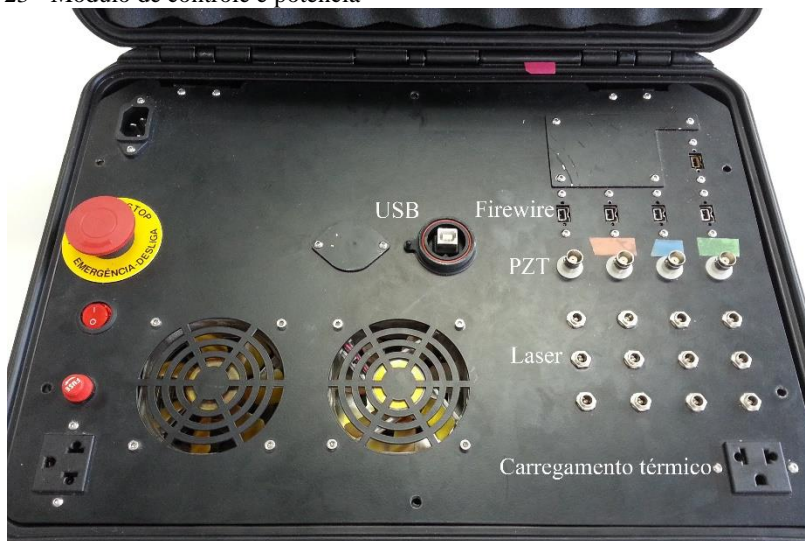
Fonte: (Taschibra, 2015)

5.1.4 Módulo de controle e potência

Para realizar a medição é necessário dispor de componentes eletrônicos que promovam o funcionamento dos módulos de iluminação, medição e carregamento. Para isso, o módulo de controle e potência desenvolvido no Labmetro/UFSC contém adaptadores, fontes, drivers e placas de controle, além de ser robusto o suficiente para a sua utilização em ambientes hostis.

Na figura 23 pode ser visualizado um módulo de controle e potência com capacidade para controlar até quatro módulos de aquisição de imagens, doze módulos de iluminação laser e um módulo de carregamento.

Figura 23 - Módulo de controle e potência



Fonte: Próprio autor

Este módulo está ligado via USB a um computador portátil que executa um software desenvolvido no Labmetro/UFSC para a realização de inspeções com shearografia e o posterior processamento dos mapas de fase resultantes. O software, através de uma placa de aquisição da National Instruments, comunica-se com um dispositivo de acionamentos a relé utilizado para acionar os módulos de iluminação e uma contatora responsável por ligar o módulo de carregamento térmico quando solicitado pelo usuário.

Ainda na placa de aquisição, está conectada uma unidade dotada de saídas analógicas para acionamento do driver que aplica uma tensão elétrica no PZT situado no módulo de medição.

Existe também um repetidor *FireWire*¹ que serve para utilização simultânea de mais módulos de aquisição de imagens (se necessário), além de amplificar o sinal da câmera possibilitando a utilização do módulo de aquisição de imagens a uma distância maior em relação ao módulo de controle e potência.

¹ *FireWire* é uma interface serial utilizada para conexão de dispositivos digitais de alta velocidade.

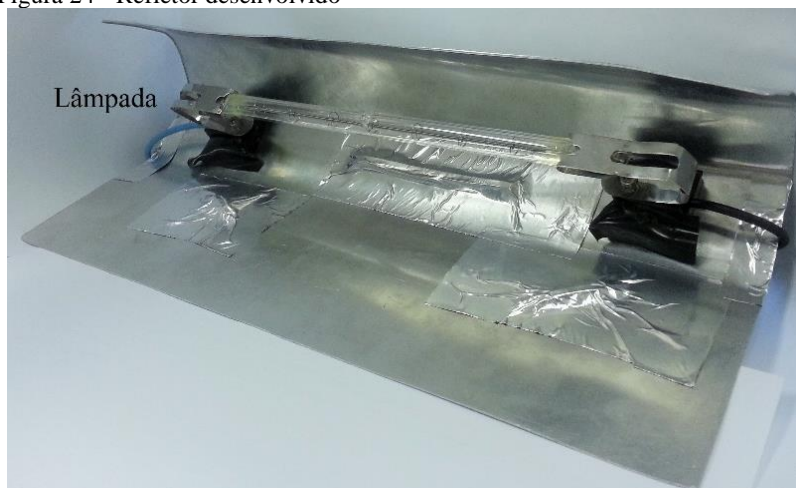
5.2 MÓDULOS DESENVOLVIDOS

5.2.1 Módulo de carregamento térmico

Os refletores utilizados nos primeiros testes e outros modelos comerciais semelhantes possuem massa e dimensões incompatíveis para a operação em conjunto com os demais módulos do sistema de shearografia. Surgiu, então, a necessidade de desenvolvimento de um refletor com dimensões compatíveis à estrutura mecânica dos sistemas, que não obstrua os módulos de iluminação e aquisição de imagens.

Na figura 24 pode ser visualizado o refletor construído com chapa de alumínio de 300 mm por 200 mm em que foi utilizada uma lâmpada infravermelha de 500 W. Esse módulo possui massa de 200 g.

Figura 24 - Refletor desenvolvido



Fonte: Próprio autor

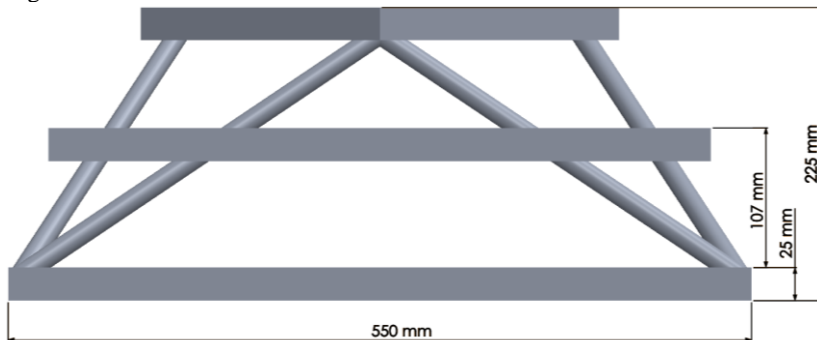
5.2.2 Módulo estrutural

De acordo com a demanda para inspeções de paredes verticais de tanques e costados de navios, nem sempre é necessária a inspeção da parede em sua totalidade, mas sim algumas regiões específicas do costado ou tanque. Desta forma, decidiu-se desenvolver dois sistemas de inspeção, um para inspeções manuais, e outro para ser utilizado em conjunto com o robô atuado por cabos.

Ambos os sistemas de inspeção utilizam o mesmo módulo estrutural, porém utilizam métodos diferentes para realizar a sua fixação na superfície revestida. Estes sistemas serão abordados nos itens 5.3 e 5.4.

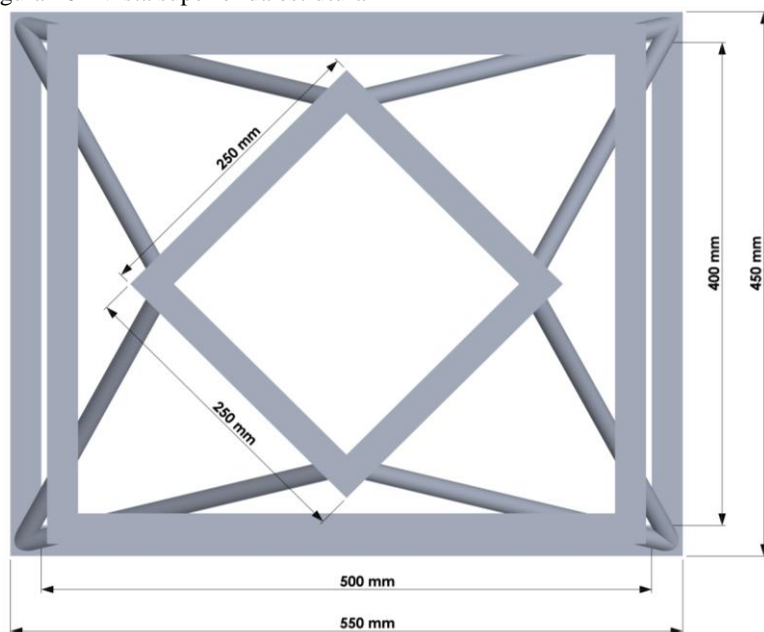
O módulo estrutural, construído para suportar os demais módulos que compõem os sistemas de inspeção, possui massa aproximada de 4 kg e é composta por perfis tubulares de liga de alumínio 6060 T5 com espessura de 1,6 mm. As figuras 25 e 26 apresentam um esquemático com as dimensões da estrutura desenvolvida, enquanto a figura 27 mostra a estrutura fabricada.

Figura 25 - Vista lateral da estrutura



Fonte: Próprio autor

Figura 26 - Vista superior da estrutura



Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Estrutura fabricada



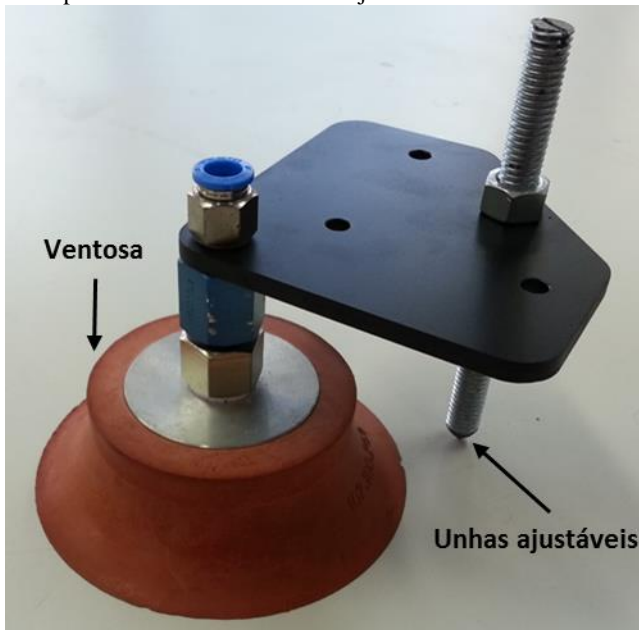
Fonte: Próprio autor

5.3 SISTEMA DE INSPEÇÃO MANUAL

O objetivo desse sistema é a inspeção de uma área específica do costado ou tanque, realizada por meio de andaimes já instalados ou até mesmo por rapel. Para o desenvolvimento do mesmo, também foram considerados os requisitos do item 4.4, com exceção ao *frame* que não é necessário ao funcionamento desse sistema.

O sistema de inspeção manual é composto pelos módulos necessários para a inspeção por shearografia apresentados nos itens 5.1 e 5.2. Além disso, é necessário dispor de um método eficiente para sua fixação ao revestimento de material compósito, a fim de garantir que o sistema atraque-se com rigidez e seja possível a realização da medição. Para a fixação à superfície inspecionada, foram utilizadas três ventosas, dispostas triangularmente com a utilização de suportes aparafusados na parte inferior da estrutura. O suporte (figura 28) é fabricado em aço SAE1020 e possui pontas cônicas de altura ajustável para que a sua fixação seja mais rígida e reduza possíveis vibrações.

Figura 28 - Suporte com ventosas e unhas ajustáveis



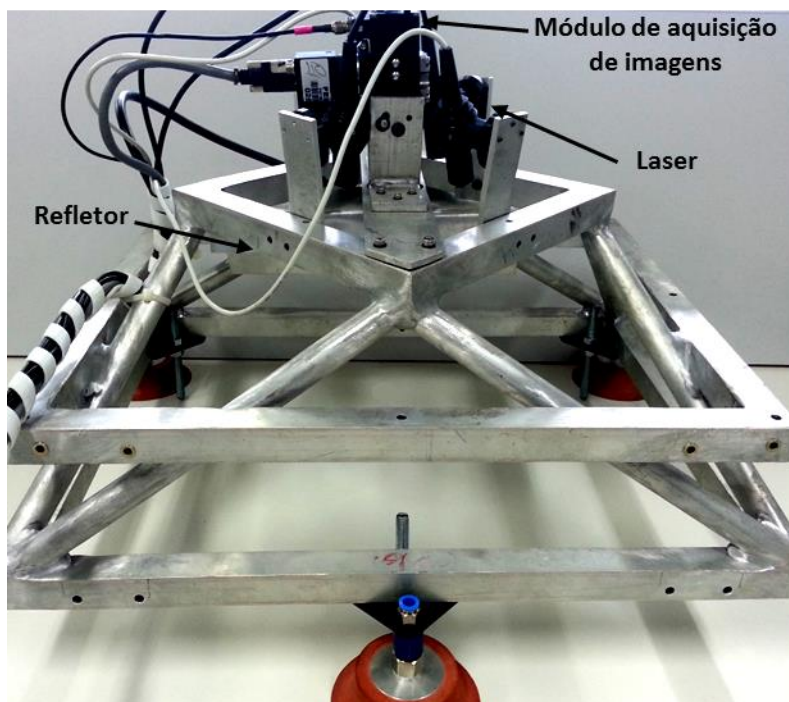
Fonte: Próprio autor

A utilização deste tipo de suporte resultou em um afastamento² de 270 mm do módulo de medição em relação à superfície, acarretando em uma área de medição de aproximadamente 470 x 365 mm².

A utilização de eletroímãs para a fixação do sistema foi também considerada. Porém, a alternativa foi descartada devido à sua massa incompatível com os requisitos de projeto, e pela inviabilidade em aplicações em que o revestimento compósito seja muito espesso e enfraqueça a ação magnética do ímã na superfície metálica revestida.

Ao final, a massa total do sistema aproximou-se de 6 kg sendo relativamente fácil o seu manuseio, transporte e operação pelo usuário. A figura 29 mostra o sistema desenvolvido com todos os módulos acoplados.

Figura 29 - Sistema de inspeção manual

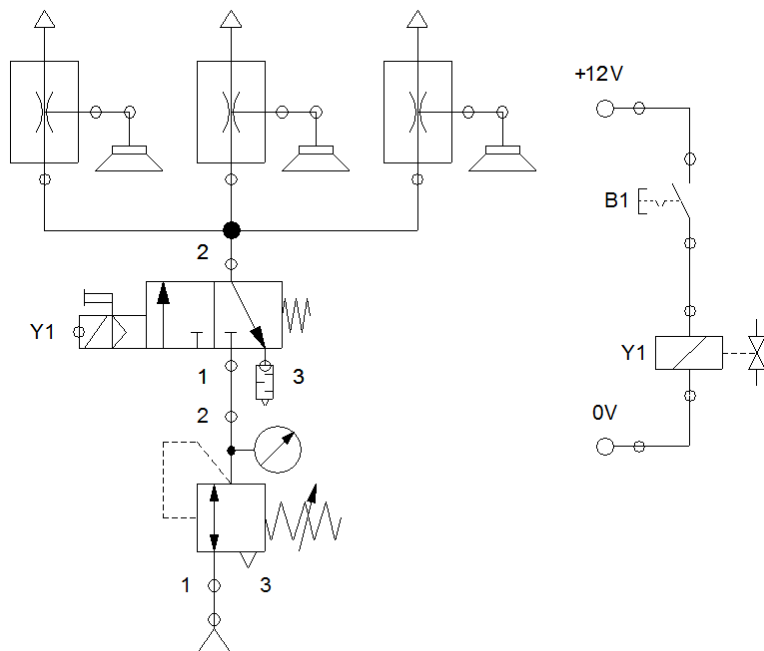


Fonte: Próprio autor

² O afastamento pode ser ajustado com algumas alterações no suporte do módulo de aquisição de imagens.

Para o acionamento das ventosas, desenvolveu-se um circuito eletropneumático (figura 30), composto por uma válvula 3/2 vias simples solenoide, um filtro regulador de pressão, três geradoras de vácuo com pressão de trabalho de 6 bar, uma fonte 12 V e um botão de acionamento³. Estes componentes podem ser vistos na figura 31.

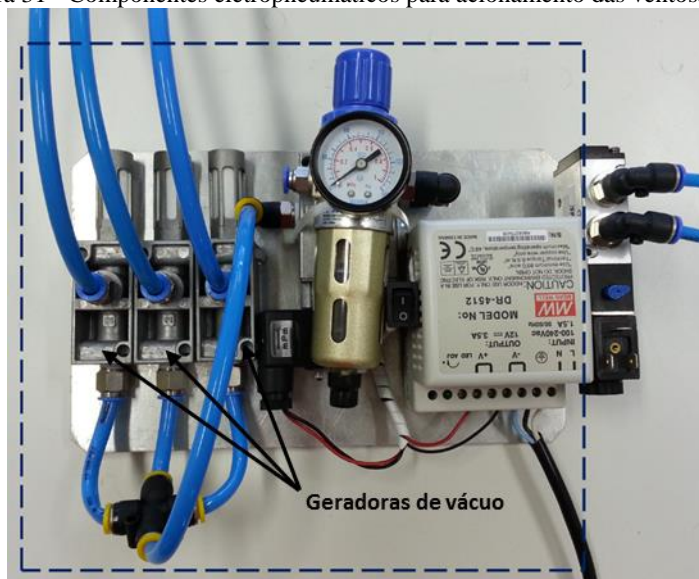
Figura 30 - Circuito eletropneumático para acionamento das ventosas



Fonte: Próprio autor

³Com poucas alterações no software de inspeção já existente e com a conexão elétrica da válvula diretamente ao módulo de controle e potência, o acionamento das ventosas pode ser facilmente realizado via software.

Figura 31 - Componentes eletropneumáticos para acionamento das ventosas



Fonte: Próprio autor

Foram utilizadas três unidades geradoras de vácuo para que as três ventosas atuem de forma independente. Desta forma, se uma das ventosas não se fixar com eficiência ao revestimento, o sistema continuará preso à superfície com as outras ventosas, mas deve ser reposicionado de forma que ocorra a fixação das três ventosas para assegurar a fixação e a estabilidade do sistema durante a medição.

5.4 SISTEMA DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA

O sistema de shearografia a ser acoplado ao robô é composto pelos módulos descritos no item 5.1 e 5.2, um dispositivo de fixação ao revestimento compósito, rodas para movimentação na superfície e um *frame* metálico para suportar as forças do robô.

O *frame* (figura 32) foi construído em perfil “L” de aço SAE1020 e possui dimensões de 490 mm por 430 mm. Ele é preso através de parafusos ao módulo estrutural e suporta as forças exercidas pelos cabos do robô.

Figura 32 - *Frame* de aço



Fonte: Próprio autor

Na parte inferior do módulo estrutural foram instaladas três rodas omnidirecionais (figura 33) para possibilitar o deslocamento do sistema de acordo com a movimentação do robô.

Figura 33 - Roda omnidirecional



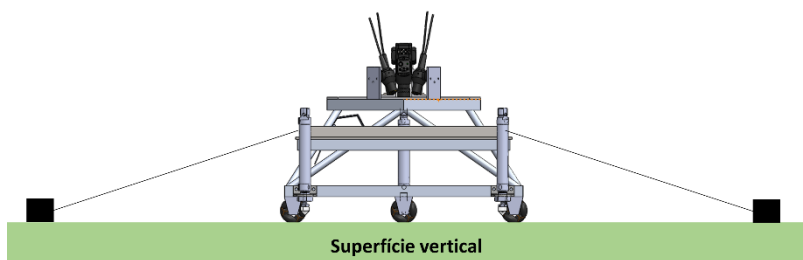
Fonte: (Rotacaster, 2014)

Para realizar a fixação na superfície e atracar o sistema durante a medição, foram utilizados três cilindros pneumáticos de 25 mm de diâmetro e 100 mm de curso acionados com pressão de 6 bar e acoplados perpendicularmente na estrutura de forma a substituir as ventosas

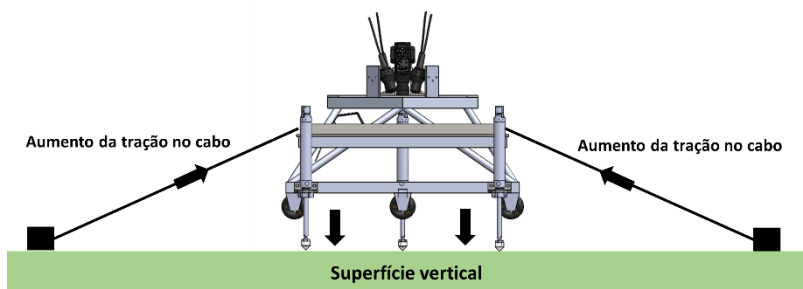
existentes no sistema manual. Como pode ser visto no desenho esquemático da figura 34 os cilindros, ao serem acionados, afastam o sistema em relação à superfície vertical em questão e aumentam a força de tração nos cabos do robô. Ao ser tracionado pelos cabos através do *frame*, o sistema de inspeção é pressionado contra o revestimento, permanecendo rígido e possibilitando a medição. Para que o revestimento não seja danificado nesse processo, foram construídas unhas cônicas em nylon e rosqueadas nas pontas dos cilindros.

Figura 34 - Fixação com cilindros pneumáticos

Sistema apoiado sobre rodas omnidirecionais



Fixação através do avanço dos cilindros



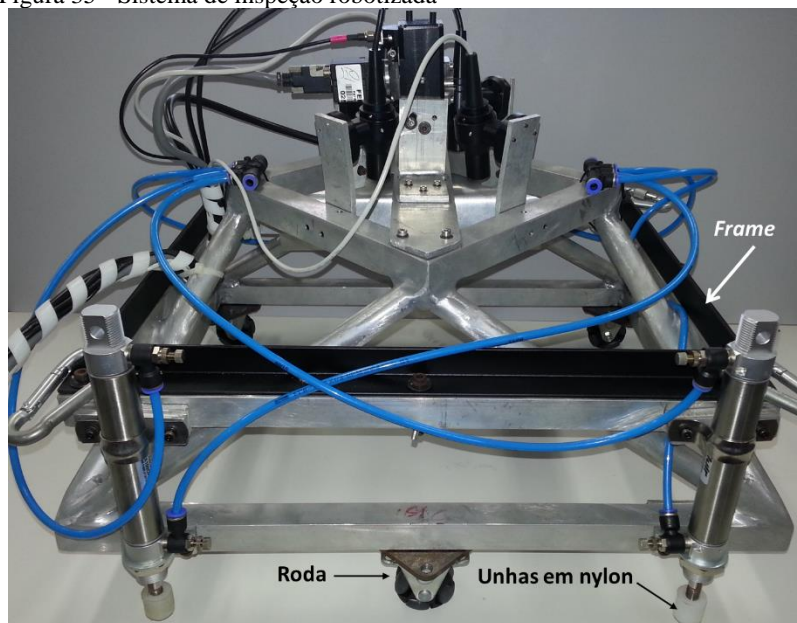
Fonte: Próprio autor

Com a utilização dos cilindros de 100 mm de curso com as unhas em nylon, o afastamento em relação à superfície ficou em torno de 330 mm, resultando em uma área de medição de 560 x 435 mm². O módulo de aquisição de imagens possui ajuste de foco, o que o torna capaz de trabalhar com diferentes valores de afastamento da superfície, que

pode ser realizado com a substituição do conjunto de cilindros por outro com curso diferente.

A massa total do sistema de inspeção a ser acoplado ao robô tem cerca de 10 kg. O sistema com seus módulos e demais componentes pode ser visto na figura 35.

Figura 35 - Sistema de inspeção robotizada

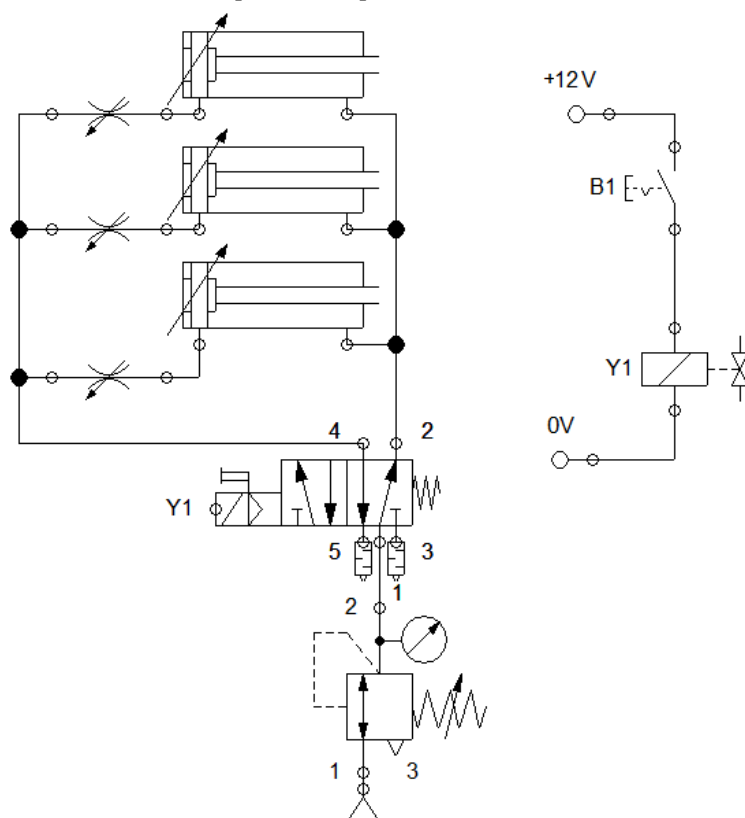


Fonte: Próprio autor

O circuito eletropneumático da figura 36 é utilizado para acionar o avanço e retorno dos cilindros e compartilha alguns dos componentes do circuito de acionamento das ventosas. Ele é composto por uma válvula 5/2 vias simples solenoide, um filtro regulador de pressão, uma fonte 12 V e botão de acionamento⁴, como pode ser visto na figura 37.

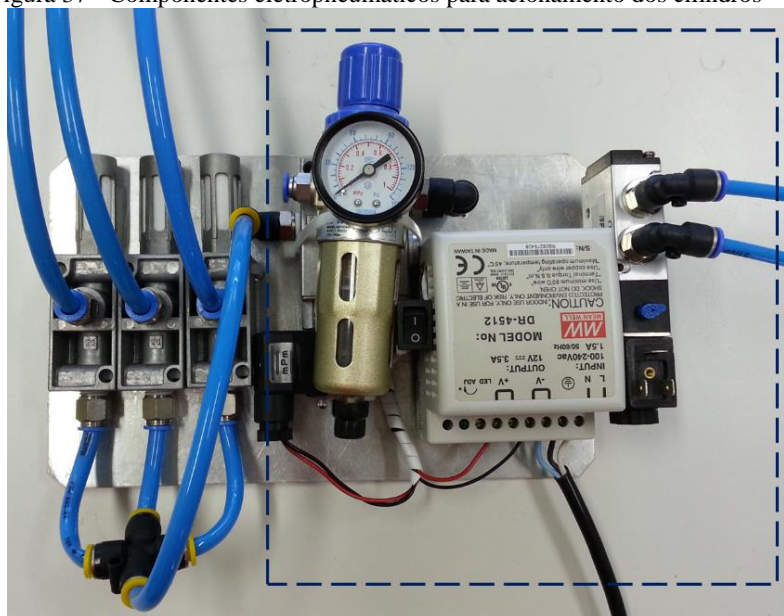
⁴Com poucas alterações no software de inspeção já existente e com a conexão elétrica da válvula diretamente ao módulo de controle e potência, o acionamento e desacionamento dos cilindros pneumáticos pode ser facilmente realizado via software.

Figura 36 - Circuito eletropneumático para acionamento dos cilindros



Fonte: Próprio autor

Figura 37 - Componentes eletropneumáticos para acionamento dos cilindros



Fonte: Próprio autor

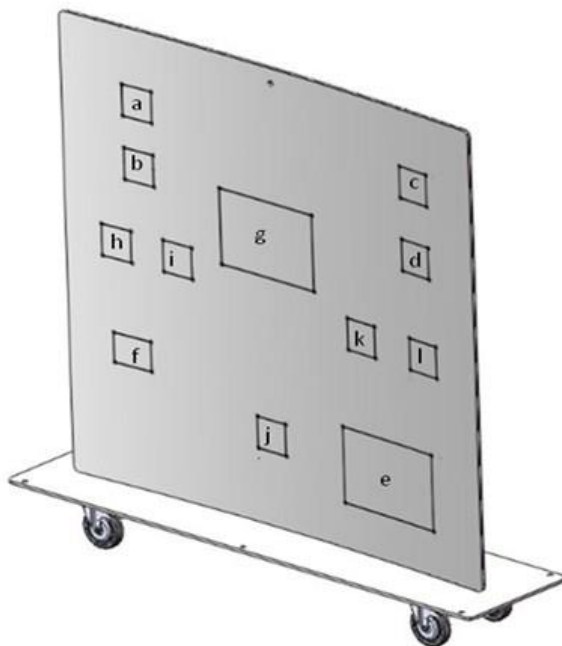
6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE INSPEÇÃO

6.1 CORPO DE PROVA

Para avaliação do desempenho dos módulos, foi utilizado um corpo de prova retangular já existente no laboratório projetado por Souza (2012). Ele simula uma região de costado de um tanque com raio aproximado de 10 m, é composto de aço ASTM A36 e tem dimensões de 1,5 m por 1,5 m com espessura de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ de polegada).

Esse corpo de prova contém elementos artificialmente introduzidos que simulam alguns dos defeitos mais comuns em revestimentos de materiais compósitos. Os defeitos são indicados de “a” a “l” e sua disposição no corpo de prova pode ser vista na figura 38.

Figura 38 - Projeto de corpo de prova com defeitos artificiais

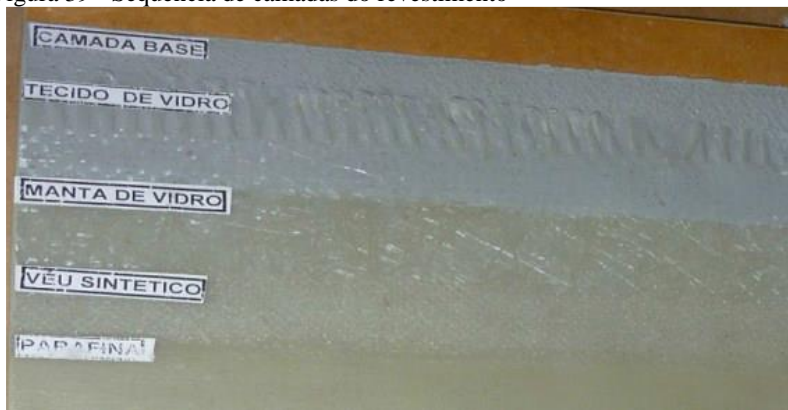


Fonte: (SOUZA, 2012)

O revestimento foi realizado pela empresa RUST ENGENHARIA e é composto por resina éster vinílica e fibra de vidro. A figura 39

demonstra a disposição das camadas do revestimento, cujas espessuras são de aproximadamente 0,5 mm.

Figura 39 - Sequência de camadas do revestimento



Fonte: (SOUZA, 2012)

Os defeitos artificiais foram elaborados pelo Labmetro/UFSC segundo a norma SAE ARP5606 e são especificados da seguinte forma:

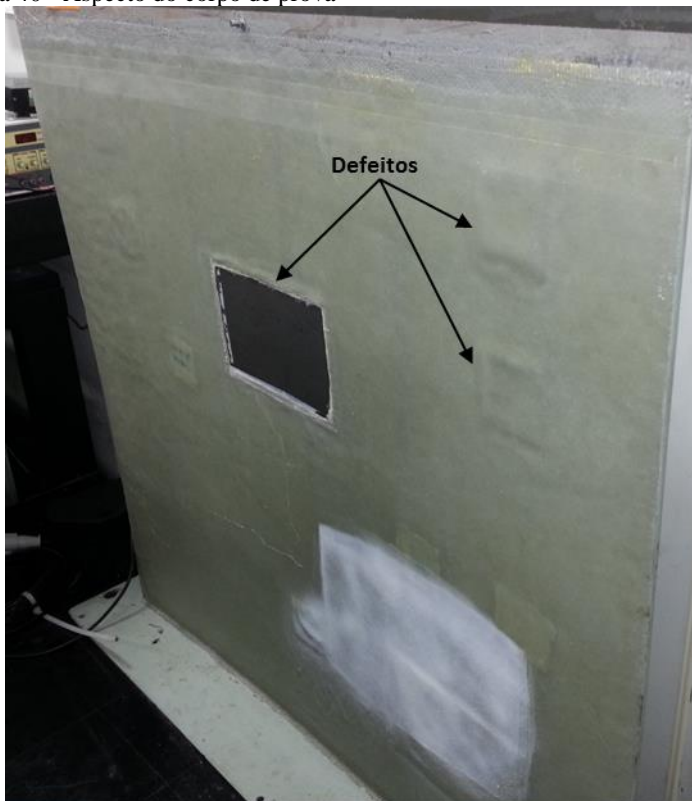
- a. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo *pillow*⁵, 100 x 100 mm² sobre aço.
- b. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo *pillow*, 100 x 100 mm² sobre aço.
- c. Filme de teflon 0,3 mm duplo *pillow*, 100 x 100 mm² sobre aço.
- d. Filme de teflon 0,3 mm duplo *pillow*, 100 x 100 mm² sobre aço.
- e. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo *pillow* 220 x 330 mm² sobre aço.
- f. Cera - Camada de cera para evitar fixação da camada base com o aço.
- g. Janela - Ausência de revestimento - 220 x 297 mm².
- h. Filme de polipropileno 0,1 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro.
- i. Filme de polipropileno 0,1 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro.

⁵ Segundo a norma SAE ARP5606 um inserto de *pillow* consiste em quatro camadas de papel dispostas entre duas camadas de filme de poliamida resistente ao calor. (SAE-INTERNATIONAL, 2001)

- j. Filme de polipropileno 0,1 mm duplo, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro.
- k. Filme de teflon 0,3 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro.
- l. Filme de teflon 0,3 mm único filme, 100 x 100 mm², entre o tecido e manta de vidro.

A figura 40 mostra o corpo de prova. É possível observar alguns defeitos mais aparentes (indicados pelas setas), além de algumas irregularidades na superfície, reproduzindo uma situação mais próxima de um reparo real de tanque ou costado de navio.

Figura 40 - Aspecto do corpo de prova



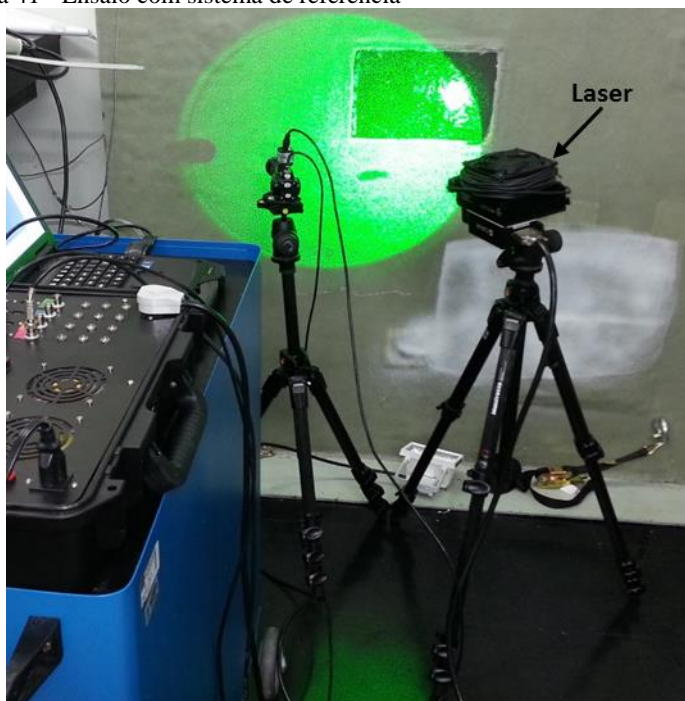
Fonte: Próprio autor

6.2 SISTEMA APOIADO SOBRE TRIPÉS

A fim de comparar os resultados de ambos os sistemas de inspeção desenvolvidos, foram realizados ensaios com um terceiro sistema já validado pela equipe de inspeções do Labmetro/UFSC tanto em laboratório quanto em inspeções em campo, doravante denominado sistema de referência.

O sistema de referência utilizado é composto pelo mesmo módulo de aquisição de imagens especificado no item 5.1.1, um módulo de iluminação laser DPSS com potência de 1000 mW e comprimento de onda de 532 nm, ambos montados sob tripé e apoiados no chão. O módulo de controle e potência especificado no item 5.1.4 foi utilizado para controlar o PZT e o carregamento térmico realizado com uma lâmpada halógena. A configuração utilizada para realizar o ensaio pode ser vista na figura 41.

Figura 41 - Ensaio com sistema de referência

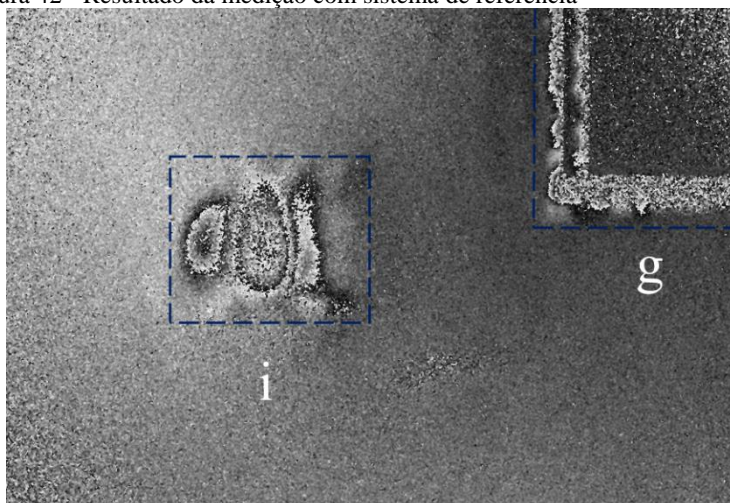


Fonte: Próprio autor

É possível variar a área a ser medida com esse sistema afastando os módulos de aquisição de imagens e iluminação em relação à superfície. Contudo, para que a área medida seja mais próxima à utilizada nos outros sistemas, a área de medição utilizada foi de 515 x 400 mm² com afastamento do módulo de medição de 300 mm da superfície.

O resultado do ensaio dos defeitos “i” e “g”, após a aplicação de um filtro passa baixa⁶ para redução de ruídos, é apresentado na figura 42.

Figura 42 - Resultado da medição com sistema de referência



Fonte: Próprio autor

O levantamento do tempo total de ensaio⁷ com a utilização desse sistema foi realizado e dividido em tempo de setup⁸, tempo de inspeção e tempo de posicionamento. O tempo de setup contempla o tempo necessário para conexão e ligação dos dispositivos antes da realização da medição e foi estimado em 8 minutos considerando os seguintes procedimentos:

⁶ Filtro para a redução de ruídos da imagem já incorporado ao software de processamento de imagens desenvolvido no Labmetro/UFSC.

⁷ Os valores estimados de tempo podem variar de operador para operador, e representam um tempo mínimo estimado para realização das tarefas de setup, inspeção e posicionamento. Esses tempos foram levantados em conjunto com a equipe de inspeção do Labmetro/UFSC.

⁸ É necessária a realização desta etapa uma única vez antes de uma série de ensaios.

- Instalação dos módulos de aquisição de imagens e iluminação nos tripés.
- Conexões de energia elétrica do notebook, módulo de iluminação e módulo de controle e potência.
- Conexões entre os módulos.

O tempo de inspeção necessário para a realização de uma medição foi estimado em 10 minutos considerando:

- Operações no software de inspeção.
- Aplicação do carregamento e visualização do defeito no software.

O tempo de posicionamento do sistema de referência foi considerado como 8 minutos. Para medição de apenas uma área com esse sistema, o tempo total estimado é de 26 minutos.

6.3 SISTEMA DE INSPEÇÃO MANUAL

Para avaliar o desempenho do sistema de inspeção manual, foram realizados vários ensaios para detecção dos defeitos do corpo de prova. O sistema foi capaz de se atracar na superfície com sucesso. No entanto, apresentou dificuldades para se fixar na parte superior do corpo de prova, onde o revestimento apresenta-se mais poroso. Também foi dificultosa a fixação com ventosas em irregularidades de maiores dimensões como, por exemplo, nas bordas do defeito “g” onde o revestimento não é contínuo e existe um degrau. Nas regiões em que foi possível posicionar e fixar o sistema de maneira correta, todos os defeitos foram identificados.

Foi utilizada uma fita com catraca durante os ensaios para segurança do sistema e evitar quedas em caso de despressurização da rede de ar comprimido. Pode ser visualizado na figura 43 o posicionamento do sistema de inspeção manual na região dos defeitos “j” e “e” para a realização de um ensaio.

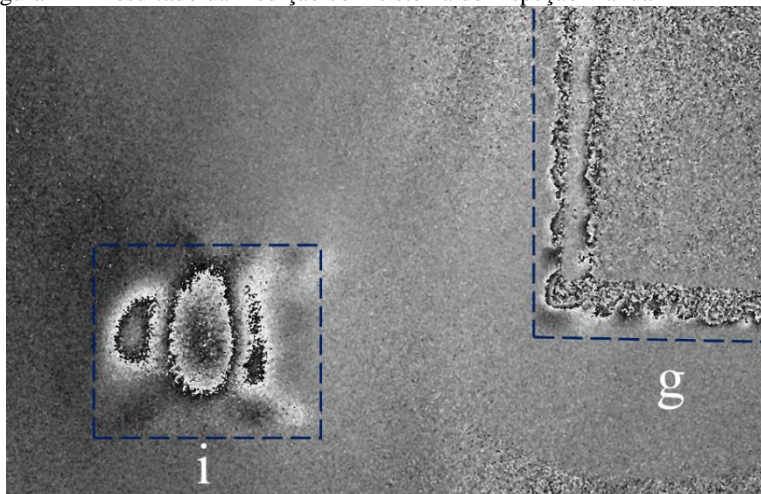
Figura 43 - Ensaio com sistema de inspeção manual



Fonte: Próprio autor

Em comparação com o resultado dos ensaios com o sistema de referência, os resultados obtidos foram muito bons, apresentando boa qualidade de imagem e fácil detecção dos defeitos. A figura 44 apresenta o resultado da medição dos defeitos “i” e “g” com a aplicação de filtro passa baixa.

Figura 44 - Resultado da medição com sistema de inspeção manual



Fonte: Próprio autor

Também foi estimado o tempo total de inspeção para esse sistema. O tempo de setup foi considerado 7 minutos para a realização das tarefas:

- Conexões de energia do notebook, módulo de iluminação, circuito pneumático e módulo de controle e potência.
- Conexões pneumáticas e entre os módulos.

O tempo de inspeção foi estimado em 10 minutos, e leva em conta:

- Operações no software de inspeção.
- Aplicação do carregamento e visualização do defeito no software.

O tempo de posicionamento desse sistema foi considerado 4 minutos e contempla o tempo de acionamento/desacionamento das ventosas, posicionamento do sistema na região de interesse e ajuste de altura das unhas (pontas cônicas).

Com a utilização desse sistema para medição de uma área apenas, o tempo total estimado é de 21 minutos.

Todos os requisitos previamente pensados para o sistema manual foram atingidos. O sistema foi capaz de detectar os defeitos com qualidade equivalente ao sistema de referência já existente, apresentou boa rigidez mecânica com acoplamentos rígidos, a fixação por ventosas foi eficaz em regiões regulares, a massa não ultrapassou 15 kg, o

afastamento em relação a superfície foi menor que 500 mm e a área de medição superior a 300 x 300 mm².

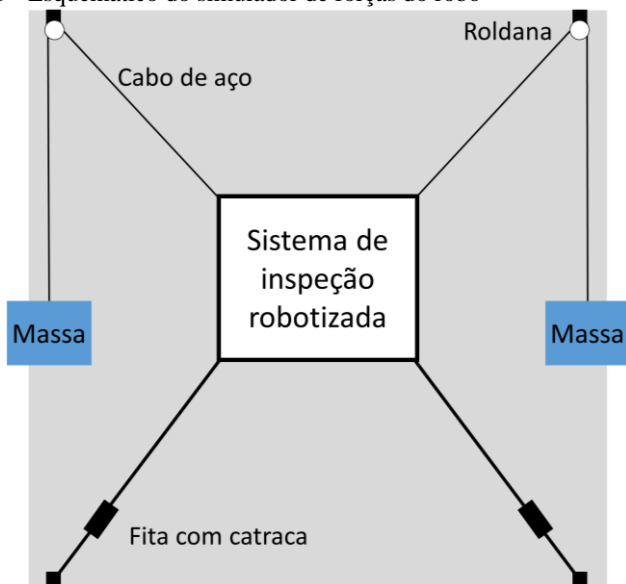
A principal vantagem na utilização desse sistema se deve ao agrupamento dos módulos de aquisição de imagens, iluminação e carregamento em uma estrutura única, rígida, compacta e de baixo peso facilitando o manuseio e o transporte do sistema.

6.4 SISTEMA DE INSPEÇÃO ROBOTIZADA

Um mecanismo para simular as forças de tração encontradas em um robô atuado por cabos foi desenvolvido e vinculado ao corpo de prova. Assim, foi possível realizar ensaios com o sistema desenvolvido para a inspeção robotizada sendo tracionado junto à superfície do corpo de prova.

O mecanismo simulador utiliza sacos de areia com massas conhecidas para a aplicação de forças nos cabos de aço ligados à parte superior do *frame*. Na parte inferior do *frame* foram utilizadas fitas com catracas, para que o sistema de inspeção pudesse ser posicionado sobre os diferentes defeitos. Um esquemático do mecanismo pode ser visualizado na figura 45.

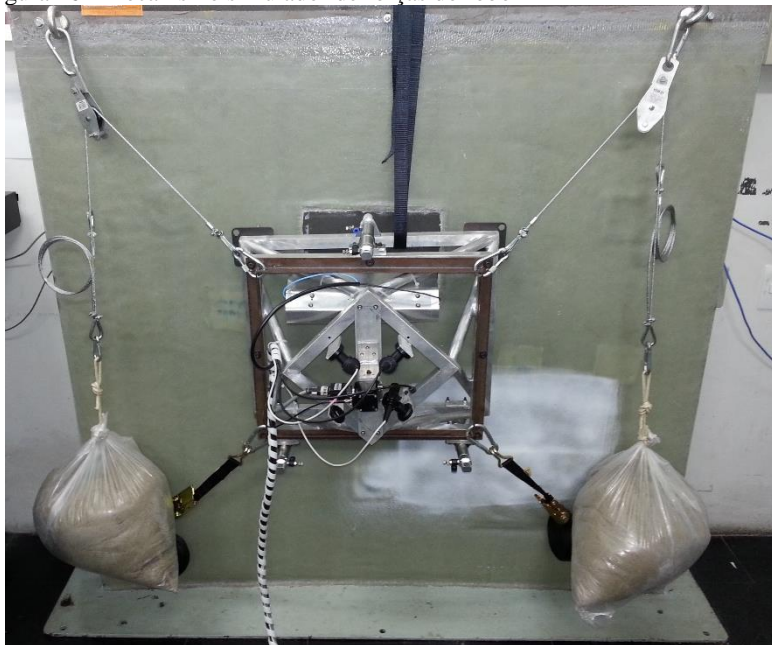
Figura 45 - Esquemático do simulador de forças do robô



Fonte: Próprio autor

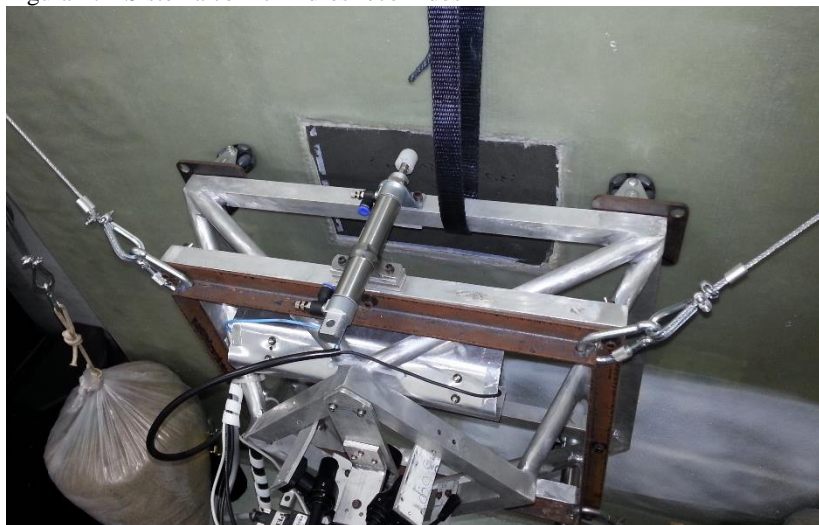
Com o uso do mecanismo simulador a área útil do corpo de prova ficou limitada à sua região central, mas ainda assim com possibilidade para posicionamento em uma área de $1 \times 1 \text{ m}^2$. O simulador não realiza movimentações como o robô, apenas reproduz estaticamente a força de tração aplicada ao *frame*, possibilitando assim o teste do mecanismo de fixação no revestimento e a inspeção dos defeitos presentes no corpo de prova. A figura 46 mostra o simulador de forças desenvolvido com a utilização de sacos de areia de 20 kg para tracionar os cabos. A figura 47 apresenta o sistema com os cilindros pneumáticos recolhidos e na figura 48 podem ser visualizados os cilindros pneumáticos acionados e a unhas para fixação no revestimento durante um ensaio.

Figura 46 - Mecanismo simulador de forças do robô



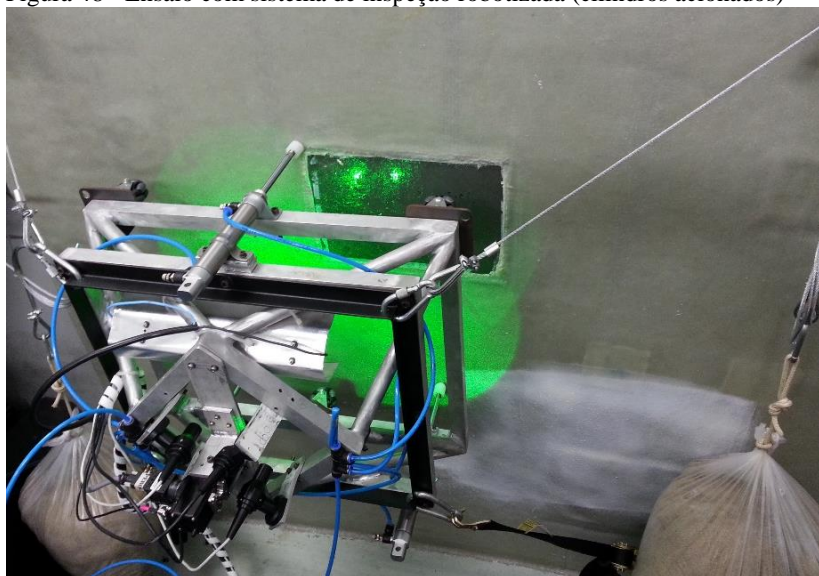
Fonte: Próprio autor

Figura 47 - Sistema com cilindros recolhidos



Fonte: Próprio autor

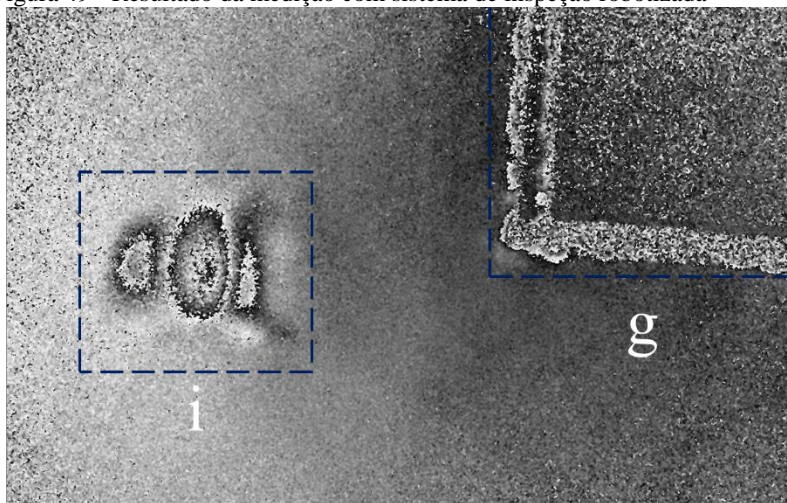
Figura 48 - Ensaio com sistema de inspeção robotizada (cilindros acionados)



Fonte: Próprio autor

O mecanismo de fixação do sistema a ser utilizado com o robô apresentou bons resultados, e manteve o sistema de inspeção rígido durante os ensaios em diversas posições no corpo de prova. Com esse sistema, o resultado da medição foi também satisfatório, apresentando facilidade para detectar os defeitos. A qualidade das imagens obtidas foi equivalente a do sistema de referência. O resultado da medição dos defeitos “i” e “g” com a aplicação de filtro passa baixa pode ser visto na figura 49.

Figura 49 - Resultado da medição com sistema de inspeção robotizada



Fonte: Próprio autor

Em comparação com o sistema manual, nas regiões com irregularidades e degraus, o sistema robotizado apresentou imagens com qualidade equivalente e obteve fixação excelente em toda as posições em que foi colocado.

Considerando que o robô atuado por cabos ou o simulador esteja pronto para acoplar o sistema de inspeção, foram estimados os tempos de setup, inspeção e posicionamento. O tempo de setup do sistema para inspeção robotizada foi considerado 12 minutos para as tarefas:

- Conexões de energia do notebook, módulo de iluminação, circuito pneumático e módulo de controle e potência.
- Conexões pneumáticas e entre os módulos.
- Acoplar sistema de inspeção aos cabos do robô/simulador.

O tempo de inspeção foi estimado em 10 minutos levando em conta:

- Operações no software de inspeção.
- Aplicação do carregamento e visualização do defeito no software.

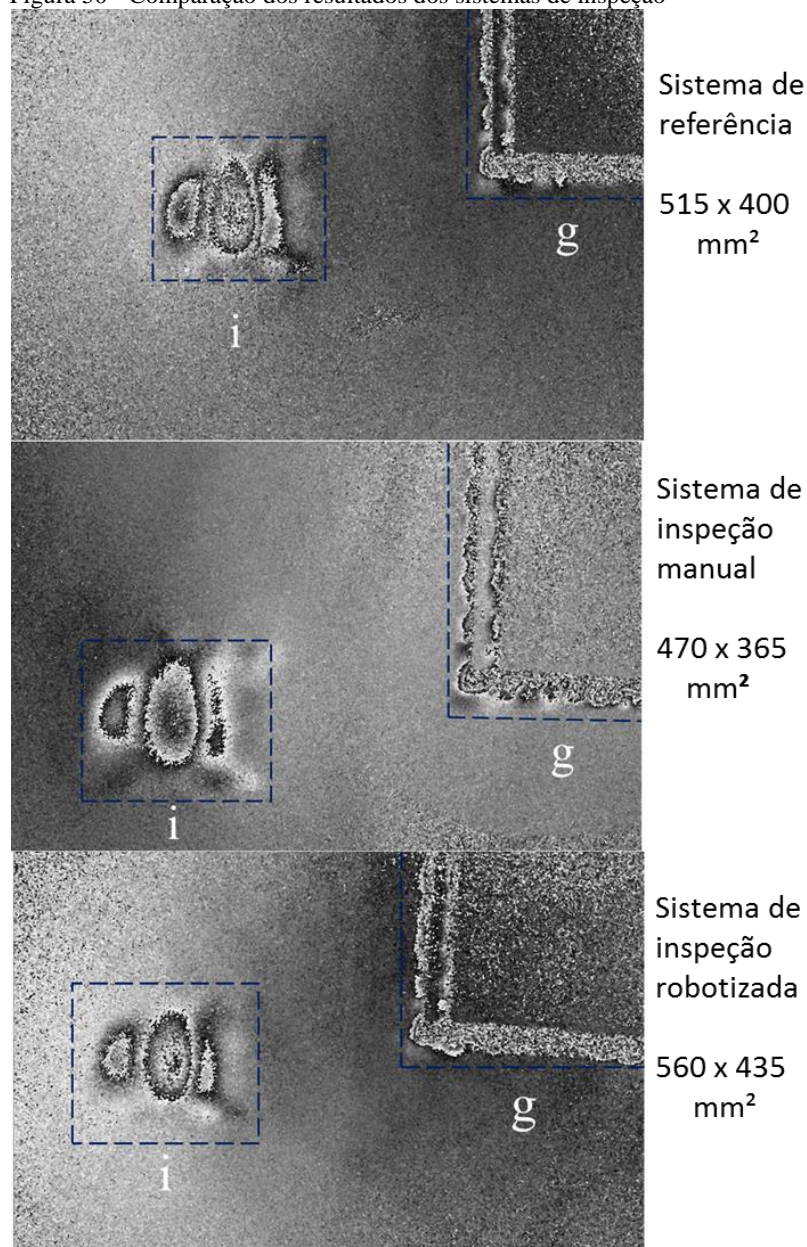
Considerando um robô atuado por cabos com velocidade de deslocamento de aproximadamente 100 mm/s, o tempo de posicionamento seria próximo de 10 segundos (0,17 minutos), incluindo o acionamento e desacionamento dos cilindros pneumáticos. A partir disso, para medição de apenas uma área o tempo total é de 22,17 minutos.

Todos os requisitos prescritos para o sistema de inspeção robotizada foram alcançados com êxito. A utilização dos cilindros pneumáticos e unhas para fixação, apresentou-se viável e manteve o sistema rígido durante a medição com a utilização do mecanismo simulador de forças do robô. A massa do conjunto não ultrapassou o valor limite de 15 kg, com *frame* menor que 1 m x 1 m, afastamento em relação a superfície foi inferior a 500 mm e a área de medição superior a 300 x 300 mm².

6.5 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS

Para comparação dos sistemas foi considerada a capacidade de detecção e a qualidade das imagens obtidas pelo software de inspeção. Assim, como ambos os sistemas desenvolvidos apresentaram resultados equivalentes ao sistema de referência, os sistemas foram considerados validados. A figura 50 apresenta, de forma agrupada para facilitar a visualização, imagens “recortadas” dos resultados da medição dos defeitos “i” e “g” pelos três sistemas.

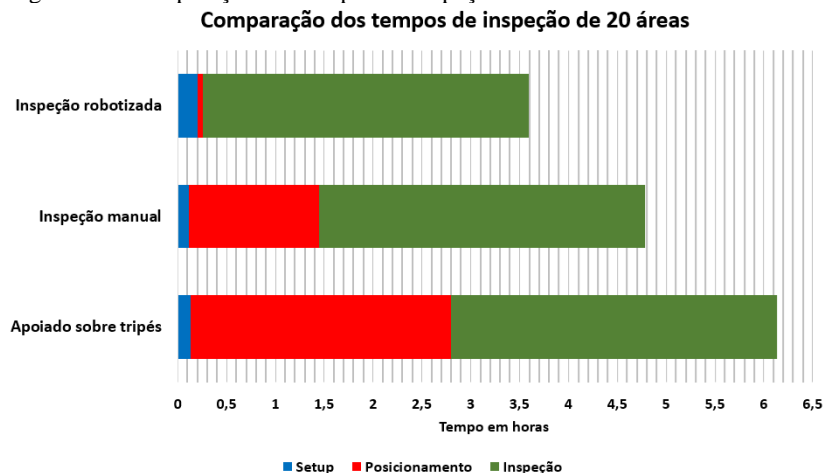
Figura 50 - Comparação dos resultados dos sistemas de inspeção



Fonte: Próprio autor

A fim de comparar os tempos de inspeção, foram estimados os tempos totais de inspeção de vinte áreas consecutivas pelos três sistemas. Foi considerado somente o tempo de setup, inspeção e posicionamento por área sem considerar a diferença da área de medição que cada sistema é capaz de medir por vez. Os dados comparativos são apresentados no gráfico da figura 51.

Figura 51 - Comparação dos tempos de inspeção



Fonte: Próprio autor

Para o sistema apoiado sobre tripés (referência) e sistema manual, deve ser considerado ainda um tempo adicional em função do reposicionamento dos sistemas nas regiões revestidas em que o acesso seja realizado por outro andar do andaime, ocasionando um tempo maior para a locomoção e transporte dos equipamentos. Além disso, com o sistema manual, esse tempo de posicionamento pode aumentar significativamente se a superfície revestida for muito irregular, necessitando que o operador encontre uma região satisfatória para a fixação do sistema com as ventosas.

A grande vantagem da utilização do sistema de inspeção robotizada em conjunto com um robô atuado por cabos está na redução do tempo de posicionamento. Para a inspeção de 20 áreas consecutivas, levando em consideração os tempos estimados, seriam necessárias 2,7 horas para realizar os 20 posicionamentos do sistema de referência, 1,3 horas para o sistema de inspeção manual, e apenas 3,4 minutos para o sistema de inspeção robotizada.

Baseando-se nos tempos totais estimados, com a utilização do robô atuado por cabos a inspeção das 20 áreas consecutivas é cerca de 41% mais rápida em relação ao sistema de referência e 25% mais rápida em relação ao sistema manual. Com a utilização do sistema manual o tempo total de inspeção é 22% mais rápido em comparação ao sistema de referência.

Além de contribuir para a redução no tempo total de inspeção, com o robô atuado por cabos é possível referenciar as áreas inspecionadas de acordo com suas coordenadas, sendo mais fácil localizá-las futuramente para realização de um reparo ou acompanhamento da evolução dos defeitos ao longo dos anos.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como resultados o desenvolvimento e avaliação de dois sistemas de inspeção com shearografia para grandes áreas verticais revestidas por materiais compósitos. Sendo um sistema de inspeção manual para a utilização em regiões específicas do revestimento, e um sistema de inspeção para ser acoplado a um robô atuado por cabos e movimentado pela superfície a ser inspecionada.

A análise dos sistemas desenvolvidos deixou claro que ambos atenderam aos requisitos de projeto e apresentaram bons resultados para detecção dos defeitos presentes no corpo de prova testado em laboratório.

Em comparação com um sistema de referência, amplamente utilizado pela equipe de inspeção do Labmetro/UFSC em ensaios em laboratório e inspeções em campo, os sistemas desenvolvidos apresentaram-se equivalentes em termos de qualidade de imagem e capacidade de detecção.

Um procedimento de inspeção foi proposto visando os próximos passos para o desenvolvimento do sistema de inspeção robotizada.

Assim sendo, com base no documento apresentado, consideram-se os objetivos gerais e específicos deste trabalho alcançados.

7.1 ASPECTOS POSITIVOS

Entre os principais aspectos positivos dos sistemas desenvolvidos, pode-se citar:

- Modularidade: os sistemas foram desenvolvidos de forma modular, o que possibilita uma rápida manutenção ou substituição dos módulos.
- Corpo de prova utilizado: a utilização do corpo de prova com defeitos artificialmente introduzidos possibilitou a validação em laboratório dos sistemas desenvolvidos.
- Fixação ao revestimento: os dispositivos desenvolvidos para realizar a fixação ao revestimento, ventosas com unhas e cilindros pneumáticos com unhas de nylon, mostraram-se excelentes alternativas para fixação, mantendo os sistemas de inspeção rígidos durante a medição sem danificar o revestimento. A fixação na superfície tanto no sistema manual quanto no sistema de inspeção robotizada influenciou positivamente na qualidade das imagens adquiridas e na capacidade de detecção de defeitos.

- Qualidade das imagens: a qualidade das imagens adquiridas por ambos os sistemas desenvolvidos foi equivalente às do sistema de referência previamente validado.
- Simulador de forças do robô: o mecanismo desenvolvido para simular as forças de tração encontradas em um robô atuado por cabos foi uma alternativa útil para realizar os ensaios com o sistema de inspeção robotizada e possibilitou a validação do mesmo.
- Facilidade de operação: os sistemas de inspeção desenvolvidos apresentaram facilidade de operação devido ao agrupamento dos módulos necessários para a medição por shearografia em uma estrutura portátil e com massa reduzida.
- Redução no tempo total de inspeção: o sistema de inspeção robotizada tem, entre todos os sistemas desenvolvidos, o maior potencial para diminuição dos tempos de inspeção de grandes áreas. A estimativa realizada para os tempos totais de inspeção mostra, em relação ao sistema de referência utilizado, uma melhora de 41% no tempo de inspeção com a utilização do sistema de inspeção robotizada e 22% com o sistema de inspeção manual.

7.2 LIMITAÇÕES

Os sistemas desenvolvidos possuem algumas limitações que foram evidenciadas com a utilização dos mesmos, e outras previstas para sua utilização em campo. Entre elas pode-se citar:

- Fixação por ventosas: o sistema de inspeção manual apresentou dificuldades de fixação em superfícies porosas e com irregularidades.
- Curvatura da superfície: em laboratório a curvatura do corpo de prova utilizado não atrapalhou a medição, porém em aplicações em campo a curvatura da superfície inspecionada pode interferir de forma a impossibilitar a utilização do sistema de inspeção manual ou de um robô atuado por cabos com o sistema de inspeção robotizada desenvolvido.
- Área de inspeção: no caso da utilização do robô atuado por cabos, a inspeção de áreas próximas aos pontos de apoio dos motores/carretéis pode ser inviabilizada devido às limitações físicas do robô.

- Vibrações no robô atuado por cabos: os cabos do robô podem transmitir vibrações ao sistema de inspeção devido à fatores ambientais e fatores intrínsecos da planta de P&G.
- Vibrações em geral: vibrações na superfície inspecionada podem impossibilitar a medição.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser realizados diversos estudos como:

- Utilizar ventosas específicas para a superfície em análise.
- Utilizar materiais mais leves para construção do módulo estrutural.
- Verificar a capacidade de detecção dos sistemas de inspeção desenvolvidos em paredes verticais com vibração.
- Avaliar o desempenho do sistema de inspeção robotizada desenvolvido em conjunto com um robô atuado por cabos.
- Medir e comparar o tempo total de inspeção com o sistema de inspeção robotizada em conjunto com um robô atuado por cabos, e sistema manual com utilização de andaimes ou rapel.
- Acionar cilindros pneumáticos e ventosas via software.
- Utilizar sensores de início/fim de curso para monitorar o avanço e recuo dos cilindros pneumáticos.
- Desenvolver algum tipo de cobertura para a estrutura e assim diminuir a iluminação externa na superfície em análise.

REFERÊNCIAS

ABENDI. **Ensaios não destrutivos e inspeção**. 2014. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly](http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=709&c=17&s=&friendly;)>. Acesso em: 17 nov. 2014.

ALBERTAZZI, Armando et al. Detecção de Falhas de Adesão entre Mantas Poliméricas e Dutos usando Interferometria de Deslocamento. In: Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, 036, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Conaend, 2006. p. 1 - 15.

ALBERTAZZI, Armando; WILLEMANN, Daniel Pedro; MENICONI, Luiz Cláudio de Marco. Um sistema prático para identificação e localização de defeitos em revestimentos de materiais compósitos utilizando shearografia. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - 186, 2007, Salvador. **Anais...** Salvador: COTEQ - 186, 2007. p. 1 - 10.

CABRAL, Thiago Destri. **Caracterização experimental de um sistema de shearografia para inspeção não destrutiva de tubulações**. 2014. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002.

FRAUNHOFER-IPA. **Cable robot IPAnema - extended version for engineers**. 2011. Disponível em: <<http://www.eu-nited.net/robotics/press-room/cable-robot-ipanema-extended-version-for-engineers.html>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

GASVIK, Kjell J. **Optical Metrology**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2002.

GAY, Daniel; HOA, Suong V.; TSAI, Stephen W.. **Composite Materials: Design and applications**. New York: CRC Press, 2003.

GOODMAN, J. W.. Some fundamental properties of speckle*. **Journal of The Optical Society of America**. p. 1145-1150. 1 nov. 1976.

Grupo Rust Resinar. **Revestimentos Reforçados com Fibras de Vidro.** 2014. Disponível em:

<<http://www.gruporustresinar.com.br/servicos/revestimentos-reforçados-com-fibras-de-vidro/sistema-fib>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

HARIHARAN, P.; OREB, B. F.; EIJU, T.. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. **Applied Optics**, Sydney, v. 26, n. 13, p.2504-2506, 1 jul. 1987.

HECHT, Eugene. **Optics**. 4. ed. San Francisco: Addison Wesley, 2002.

HUNG, Y.Y.; HO, H.P.. Shearography: An optical measurement technique and applications. **Science Direct**, v. 49, p.61-87, 19 abr. 2005.

JONES, R. M.. **Mechanics of composite Materials**. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C.. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

LINS, Kamila Pereira. **Procedimento para avaliação da profundidade de defeitos em placas de materiais compósitos usando shearografia com excitação térmica**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MALLICK, P. K.. **Composites Engineering Handbook**. New York: Marcel Dekker Inc, 1997. 1249 p.

MOHAN, N. K.. Speckle Methods and Applications. In: YOSHIZAWA, T. **Handbook of OPTICAL METROLOGY: Principles and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 1-729.

PAES, Átila da Silva. **Proposta de procedimento para estimativa do tamanho de defeitos em tubos de aço perfurados e revestidos com materiais compósitos utilizando shearografia**. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PAES, D. S.; SILVA, F. A. A.. **Inspeção de defeitos em materiais compósitos com shearografia e excitação por vibração**: Relatório do trabalho final da disciplina Metrologia Óptica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: UFSC, 2010. 18 p.

PANTOJA, Francisco Carlos Melo. Prefácio II. In: REZENDE, M.C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C.. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011. 396 p.

Rotacaster. **Rotacaster 48mm Double (Solid) hard polymer roller/Fork Mounted**. 2014. Disponível em: <<http://www.rotacaster.com.au/shop-product/48mm-mounted-solutions--r2/rotacaster-48mm-double--solid--hard-polymer-roller---fork-mounted>>. Acesso em: 09 maio 2014.

Rust Engenharia. **Galeria - Petróleo & gás**. Disponível em: <<http://www.rust.com.br/galeria/petroleo--gas>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

SAE-INTERNATIONAL. Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. ARP 5606: Composite Honeycomb NDI Reference Standards. 2001-09, Warrendale, p. 30, 2001.

SCHÖNTAG, Juliana Marques. **Caracterização da profundidade de defeitos em materiais compósitos utilizando shearografia com carregamento vibracional**. 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SCHÖNTAG, Juliana; WILLEMANN, Daniel; ALBERTAZZI, Armando. Depth Assessment of Defects in Composite Plates Combining Shearography and Vibration Excitation. **Speckle 2010: Optical Metrology**, v. 7387, n. 1Z, p.1-9, 13 set. 2010.

SOUZA, João Paulo Ferreira Martins de. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

STEINCHEN, Wolfgang; YANG, Lianxiang. **Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry**. Bellingham: Spie Press, 2003.

TASCHIBRA. **Refletor TR 15/ 50**. 2015. Disponível em: <<http://www.taschibra.com.br/site/web/pt/produto/refletor-tr>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

VIOTTI, Matias R.; ALBERTAZZI JR, Armando. **Robust Speckle Metrology: Techniques for Stress Analysis and NDT**. Bellingham: Spie Press, 2014.

WILLEMANN, Daniel P. et al. Análise comparativa de técnicas de carregamento para avaliação de defeitos em juntas adesivadas de tubos compósitos usando shearografia. In: Primeiro Encontro Técnico de Inspeção e Ensaios Não Destrutivos da Rede de Materiais, 1., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Primeiro Encontro Técnico de Inspeção e Ensaios Não Destrutivos da Rede de Materiais, 2011. p. 1 - 11.

WILLEMANN, Daniel P. et al. Detecção de defeitos em juntas adesivadas de tubos compósitos com shearografia, termografia e ultrassom. In: CONAEND & IEV, 071, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CONAEND & IEV, 2008. p. 1 - 12